

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Sedak-Benčić

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Mirko Jakopčić, dipl. ing.

Student:

Ivan Sedak-Benčić

Zagreb, 2014

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Mirku Jakopčiću na pomoći tijekom studiranja i izradi diplomskog rada, te na svoj literaturi koju mi je poklonio za vrijeme studiranja.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Krešimiru Grilecu, doc. dr. sc. Darku Landeku i laborantu Ivanu Vovku na pomoći oko analize uzoraka.

Ivan Sedak-Benčić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **IVAN SEDAK-BENČIĆ**

Mat. br.: 0035171107

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ANALIZA MATERIJALA CIJEVI STRELJAČKOG ORUŽJA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **ANALYSIS OF SMALL ARMS BARREL MATERIAL**

Opis zadatka:

Cijev oružja je nositelj procesa opaljenja, tijekom kojega dolazi do izgaranja barutnog punjenja, kretanja projektila ili zrna uzduž cijevi i postizanja njegove potrebne brzine na ustima cijevi. Tijekom opaljenja se u cijevi razvijaju snažni mehanički, toplinski i kemijski procesi, čime je materijal cijevi izložen djelovanju višestrukih mehanizama trošenja. U uvjetima intenzivnog paljbenog djelovanja dolazi do pregrijavanja cijevi, što rezultira promjenom strukture i tvrdoće materijala, te promjenom tribološke otpornosti materijala.

U ovom radu je potrebno:

1. Prikazati namjenu, osnovne konstrukcijske značajke i materijal cijevi streljačkog oružja,
2. Prikazati značajke procesa opaljenja,
3. Provesti kemijsku analizu ispitnih uzoraka izrezanih od cijevi odabranih tipova streljačkog oružja,
4. Dio uzoraka materijala cijevi zagrijavati na temperature od 600°C do 1000 °C i hladiti na zraku,
5. Provesti metalografsko snimanje zagrijavanih i nezagrijavanih uzoraka, te izmjeriti tvrdoću po poprečnom presjeku uzoraka.
6. Analizirati rezultate i dati zaključak.

Zadatak zadan:

8. svibnja 2014.

Rok predaje rada:


10. srpnja 2014.


Predviđeni datum obrane:

16., 17. i 18. srpnja 2014.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:


Izv. prof. dr. sc. Mirko Jakopčić


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK	VI
1. UVOD	1
2. NAMJENA CIJEVI STRELJAČKOG ORUŽJA	2
3. KONSTRUKCIJSKE ZNAČAJKE ISPITIVANOG STRELJAČKOG ORUŽJA	5
3.1. Jurišna puška „Zastava M-70“	5
3.2. Poluteška strojnica „Browning M2“	6
3.3. Teška strojnica „KPVT 14,5 mm“	7
4. KONSTRUKCIJSKE ZNAČAJKE, MATERIJAL I GLAVNI DIJELOVI CIJEVI ISPITIVANOG STRELJAČKOG ORUŽJA	9
4.1. Konstrukcijske značajke cijevi	9
4.2. Materijal cijevi	10
4.3. Glavni dijelovi cijevi	11
5. ZNAČAJKE PROCESA OPALJENJA I UGRIJAVANJA CIJEVI VATRENOG ORUŽJA	13
5.1. Značajke procesa opaljenja	13
5.2. Značajke procesa ugrijavanja cijevi	15
6. KEMIJSKA ANALIZA MATERIJALA CIJEVI	17
7. METALOGRAFSKA ANALIZA I ISPITIVANJE TVRDOĆE UZORAKA	18
7.1. Priprema uzoraka za metalografsku analizu	18
7.2. Analiza uzorka 7,62 mm	23
7.3. Analiza uzorka 12,7 mm	29
7.3.1. Analiza uzorka 12,7 mm na temelju teorijskih podataka	35
7.4. Analiza uzorka 14,5 mm	42
ZAKLJUČAK	48
LITERATURA	49

POPIS SLIKA

Slika 1. Sustav cijev-zrno-barutno-punjenje-zatvarač.....	2
Slika 2. Zrno na ustima cijevi	3
Slika 3. Prikaz ožlijebljenih cijevi, te njihovog utjecaja na zrno u letu	3
Slika 4. Ciljničke naprave	4
Slika 5. Ovisnost porasta temperature o broju ispaljenih metaka	4
Slika 6. Različite inačice jurišne puške M-70.....	5
Slika 7. Bravljenje „Browninga M2	6
Slika 8. Poluteška strojica „Browning M2“	7
Slika 9. Teška strojica „KPVT 14,5 mm“	8
Slika 10. Raspodjela tlaka p i naprezanja σ na presjeku samoojačane cijevi nakon rasterećenja	9
Slika 11. Postupak poboljšavanja čelika.....	11
Slika 12. Glavni dijelovi cijevi.....	11
Slika 13. Prikaz cijevi ručnog vatrenog oružja	12
Slika 14. Proces opaljenja u cijevi.....	13
Slika 15. Ovisnost tlaka barutnih plinova p i brzine v o prijađenom putu x zrna	14
Slika 16. Ovisnost tlaka barutnih plinova p i brzine v o vremenu kretanja zrna t	14
Slika 17. Utjecajni parametri procesa ugrijavanja cijevi	16
Slika 18 . Kemijska analiza uzoraka.....	17
Slika 19. Dijelovi dotrajale cijevi.....	18
Slika 20. Izrezani uzorci iz cijevi vatrenog oružja	18
Slika 21. Uzorci zaliveni u polimernu masu	19
Slika 22. Mikroskop OLYMPUS BH-2	19
Slika 23. Mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom.....	20
Slika 24. Metalografske snimke nezagrijavanog uzorka 7,62 mm	21
Slika 25. Metalografske snimke nezagrijavanog uzorka 12,7 mm	22
Slika 26. Metalografske snimke nezagrijavanog uzorka 14,5 mm	23
Slika 27. Metalografske snimke uzorka 7,62 mm ugrijavanog na 600°C	24
Slika 28. Metalografske snimke uzorka 7,62 mm ugrijavanog na 700°C	25
Slika 29. Metalografske snimke uzorka 7,62 mm ugrijavanog na 800°C	26
Slika 30. Metalografske snimke uzorka 7,62 mm ugrijavanog na 900°C	27
Slika 31. Metalografske snimke uzorka 7,62 mm ugrijavanog na 1000°C	28
Slika 32. Metalografske snimke uzorka 12,7 mm ugrijavanog na 600°C	30
Slika 33. Metalografske snimke uzorka 12,7 mm ugrijavanog na 700°C	31
Slika 34. Metalografske snimke uzorka 12,7 mm ugrijavanog na 800°C	32
Slika 35. Metalografske snimke uzorka 12,7 mm ugrijavanog na 900°C	33
Slika 36. Metalografske snimke uzorka 12,7 mm ugrijavanog na 1000°C	34
Slika 37. a) Ovisnost promjene temperature cijevi o broju ispaljenih hitaca b) Ovisnost promjene temperature cijevi o vremenu ugrijavanja	38
Slika 38. Ovisnost promjene vlačne čvrstoće materijala o temperaturi popuštanja.....	39

Slika 39. Ovisnost promjene tvrdoće materijala o promjeni temperature	40
Slika 40. Promjena tvrdoće u ovisnosti o parametru popuštanja	41
Slika 41. Ovisnost parametra P o vremenu popuštanja	41
Slika 42. Metalografske snimke uzorka 14,5 mm ugrižavanog na 600°C	43
Slika 43. Metalografske snimke uzorka 14,5 mm ugrižavanog na 700°C	44
Slika 44. Metalografske snimke uzorka 14,5 mm ugrižavanog na 800°C	45
Slika 45. Metalografske snimke uzorka 14,5 mm ugrižavanog na 900°C	46
Slika 46. Metalografske snimke uzorka 14,5 mm ugrižavanog na 1000°C	47

POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristike jurišne puške M-70	5
Tablica 2. Karakteristika „Browninga M2“	7
Tablica 3. Karakteristike „KPVT“-a	8
Tablica 4. Rezultati kemijske analize	17
Tablica 5. Promjena temperature cijevi u ovisnosti o broju opaljenja	37
Tablica 6. Izračun parametra popuštanja	40

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
d	mm	kalibar cijevi
p	N/mm^2	tlak u cijevi
p_b	N/mm^2	tlak pripaljivanja baruta
p_k	N/mm^2	tlak barutnih plinova po završetku izgaranja barutnog punjenja
p_m	N/mm^2	najveći tlak barutnih plinova
p_{ut}	N/mm^2	tlak utiskivanja zrna
t	s	vrijeme
t_k	s	vrijeme kretanja projektila do završetka izgaranja barutnog punjenja
t_m	s	vrijeme kretanja projektila do postizanja tlaka p_m
t_u	s	vrijeme kretanja projektila do izlaska iz usta cijevi
t_3	s	vrijeme kretanja projektila do postizanja brzine v_{max}
v_k	m/s	brzina projektila u trenutku t_k
v_m	m/s	brzina projektila u trenutku t_m
v_0	m/s	početna brzina projektila
v_{max}	m/s	najveća brzina projektila
x	mm	prijeđeni put
x_k	mm	put projektila do završetka izgaranja barutnog punjenja
x_m	mm	put projektila do trenutka postizanja tlaka p_m
x_u	mm	put projektila do izlaska iz usta cijevi
x_3	mm	put projektila do postizanja brzine v_{max}
ϑ	°C	temperatura
t_{gr}	s	vrijeme ugrijavanja stijenke cijevi
V	m^3	volumen stijenke cijevi
A	m^2	površina unutarnje stijenke cijevi
c	J/kg	specifični toplinski kapacitet
ρ	kg/m^3	gustoća materijala cijevi
α	W/m^2K	koeficijent prijelaza topline
ε	1	koeficijent usporenja ugrijavanja
$\vartheta_{plinova}$	°C	temperatura barutnih plinova
$\vartheta_{početna}$	°C	početna temperatura stijenke cijevi
$\vartheta_{kona čna}$	°C	konačna temperatuara stijenke cijevi

SAŽETAK

Cijev je glavni dio vatrenog oružja. Ona je nositelj procesa opaljenja i najopterećeniji je dio vatrenog oružja. Tijekom izgaranja barutnog punjenja, te kretanja projektila kroz cijev, unutar volumena cijevi dolazi do oslobađanja visokih temperatura i tlakova uslijed čega nastaju visoka toplinska i mehanička opterećenja cijevi. Kod nekontroliranog režima paljbe na cijevi mogu nastati razna oštećenja, bilo od toplinskog umora, visokog tlaka, ili povećanog trošenja kao posljedice pada tvrdoće cijevi.

U ovom radu ispitivane su cijevi od tri različite vrste streljačkog oružja. Cilj ispitivanja je bio određivanje promjena mehaničkih svojstava cijevi koje nastaju pri različitim visinama temperaturnog opterećenja kroz vrijeme od 1 h. Cijevi su se toplinski opterećivale u peći za toplinsku obradu na temperaturama od 600°-1000°C, te su hladene na zraku pri čemu su se oponašali stvarni uvjeti koji nastaju u cijevi prilikom paljbe.

Analiziran je kemijski sastav, te promjene mikrostrukture i tvrdoće koje nastaju pri različitim temperaturama toplinskog opterećenja. Konačno su prikazani rezultati analize, te je dan zaključak.

SUMMARY

The barrel is the main part of the firearm. It is responsible for the process of firing and it is the most loaded part of the firearm. During the combustion of gunpowder, and the movement of the projectile through the barrel, the volume inside the barrel comes to the release very high temperatures and pressures which occur due to high thermal and mechanical loads of the barrel. Uncontrolled fire regimes in barrel can cause a variety of damage, either from thermal fatigue, high mechanical pressure, or increased wear as a result of the fall of hardness.

This paper shows the analysis of three different types of firearm barrels. The aim of the study was to determine the changes in the mechanical properties of the barrels that are formed at different heights of the temperature load for a period of 1 h. The barrels are heated in furnaces at temperatures of 600 °-1000 ° C, and are cooled by the air in which they simulated the actual conditions occurring in the barrel during firing.

We analyzed the chemical composition, microstructure and hardness changes that occur at different temperatures heat load. Finally the results of the analysis and the conclusion are given.

1. UVOD

Streljačko naoružanje je izraz koji se koristi za vatreno oružje manjeg kalibra kojim se služi vojni rod pješništvo u svrhu neutralizacije neprijateljske žive sile, odnosno neposredne obrane. Osnovna podjela streljačkog oružja je sljedeća:

- pištolji;
- puške;
- i strojnice.

U ovom radu će se obrađivati dvije skupine streljačkog oružja, točnije jurišna puška M-70 .30 cal, te poluteška strojnica Browning M2 .50 cal i teška strojnica KPV 14,5 mm. Obje skupine spadaju u tzv. automatska oružja. Automatsko oružje je oružje kod kojega se rad nastalih barutnih plinova prilikom opaljenja koristi za potiskivanje zrna iz cijevi, te za kretanje pokretnih dijelova oružja. Ovisno o tipu oružja mogu se pokretati različiti pokretni dijelovi, ali svima je zajedničko da se nakon opaljivanja pokreće, tj. „otvara“ zatvarač cijevi, te da izbacuje praznu čahuru. Sva automatska oružja za svoj rad koriste sjedinjeni metak koji je razvijen pred kraj 19. st., čime je naposljetku i omogućen nastanak takvog oružja. Energija potrebna za rad automatskog oružja dobiva se izgaranjem bezdimnog baruta prilikom opaljenja. Kemijska energija baruta najprije se pretvara u toplinsku, a zatim u kinetičku energiju zrna i pokretnih dijelova oružja.

Automatska oružja imaju veliku vatrenu moć i gustoću paljbe, te zbog toga omogućuju vrlo brzo i učinkovito djelovanje, pa je težnja da svaki vojnik današnjice bude naoružan takvim oružjem.

U cilju kvalitetne obrade teme diplomskog rada, rad je sastavljen od nekoliko poglavlja. U prvom dijelu rada prikazana je namjena, konstrukcijske značajke, te glavni dijelovi cijevi ručnog vatrenog oružja. U nastavku je analiziran kemijski sastav, te je provedena metalografska analiza uzoraka. U zadnjem poglavlju dan je zaključak rada.

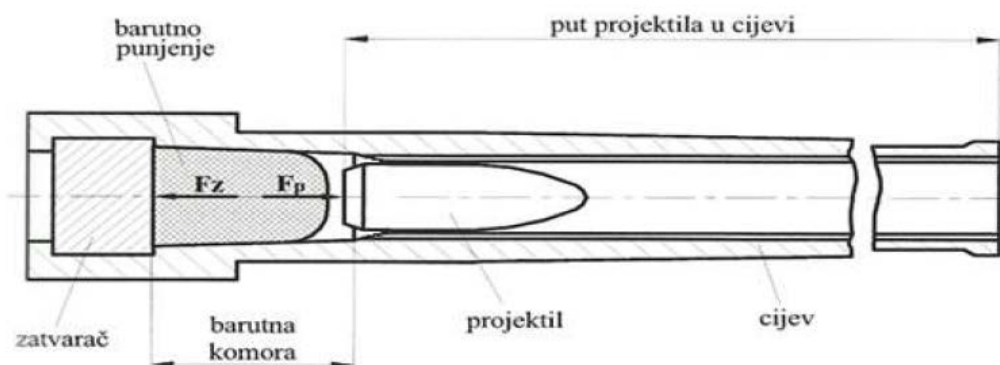
Radi lakšeg praćenja i razumijevanja prikazanog sadržaja, u rad je uneseno 46 slika i 6 tablica.

2. NAMJENA CIJEVI STRELJAČKOG ORUŽJA

Namjena cijevi streljačkog oružja je sljedeća:

1. u cijevi se vrši proces opaljenja,
2. zrno dobiva početnu brzinu i rotaciju,
3. pomoću cijevi se zrno usmjerava prema cilju [1].

1. Proces opaljenja – Prilikom opaljenja, u cijevi započinje složen dinamički proces koji se sastoji od pretvorbe kemijske energije baruta najprije u toplinsku energiju barutnih plinova, a zatim u kinetičku energiju kretanja projektila i pokretnih dijelova oružja. Proces opaljenja odvija se u sustavu koji čine cijev, projektil, barutno punjenje i zatvarač. Sam proces će biti detaljnije opisan u 5. poglavlju. (sl. 1.)[1].



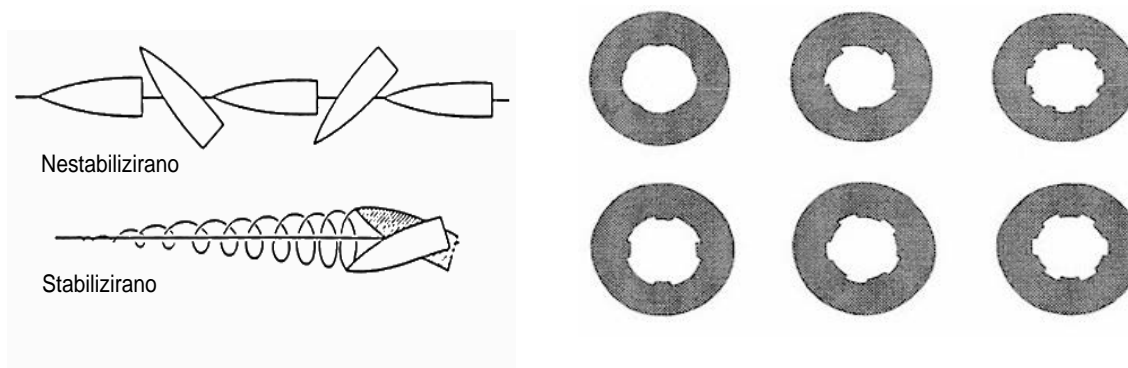
Slika 1. Sustav cijev-zrno-barutno-punjenje-zatvarač[1]

2. Zrno dobiva početnu brzinu i rotaciju – ovisno o različitom kalibru, tj. promjeru zrna, masi zrna, vrsti baruta i masi barutnog punjenja, duljini cijevi i drugim parametrima zrno dobiva početnu brzinu v_0 . Procesom koji se odvija od zapaljenja baruta sve do izlaska zrna iz cijevi, bavi se grana znanosti koja se naziva unutarnja balistika. Procesom koji se odvija nakon izlijetanja zrna iz cijevi, bavi se vanjska balistika. Na unutarnju balistiku utječu gore spomenuti parametri, dok na vanjsku balistiku utječu uvjeti okoliša- temperatura, tlak, brzina vjetra, gravitacija i sl. Na slici 2. prikazano je zrno neposredno nakon izlijetanja iz cijevi.



Slika 2. Zrno na ustima cijevi[2]

Zrno svojom rotacijom postiže stabilnost u letu. Na slici 3. a) prikazana su dva zrna ispaljena iz dvije različite cijevi. Zrno koje je nestabilizirano, ispaljeno je iz neožlijebljene cijevi, dok je stabilizirano zrno ispaljeno iz ožlijebljene cijevi. Pomoću raznih tehnologija mogu se dobiti precizno obrađene unutarnje stijenke cijevi, kojima se postiže odgovarajuća brzina rotacije. Na slici 3. b) prikazane su različite vrste žlijebljenja sa različitim brojem žljebova.

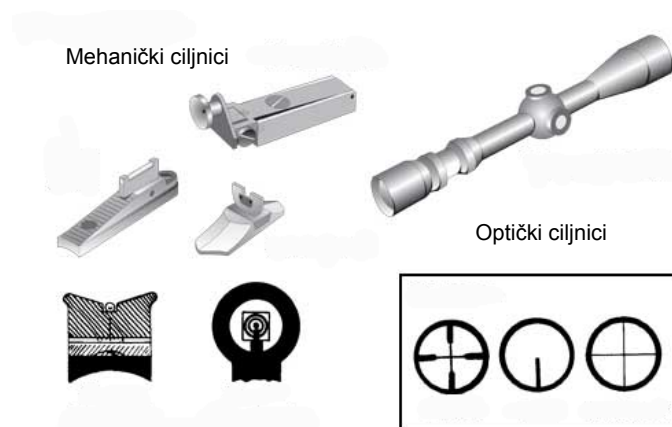


Slika 3. Prikaz ožlijebljenih cijevi, te njihovog utjecaja na zrno u letu[3]

a) stabilizacija zrna b) različiti tipovi ožlijebljenja

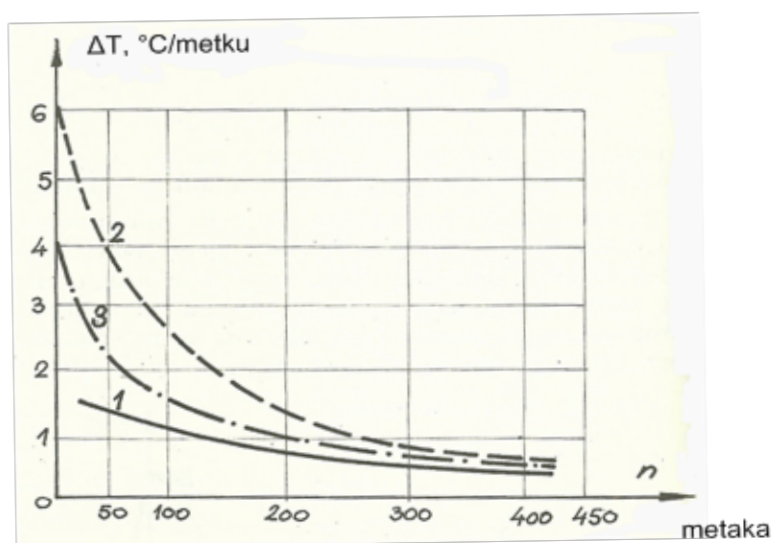
3. Cijev usmjerava zrno prema cilju – ovisno o željenom cilju, strijelac pomoću osjetila vida korigira smjer cijevi, bilo ručno ili mehanički. Kako bi se ta korekcija olakšala postoje različite mehaničke i optičke naprave (sl. 4.). Na točan pogodak utječe sposobnost strijelca, stanje i kvaliteta oružja (cijevi), te okolišni uvjeti. Od svega se najviše može utjecati na oružje. Prilikom nekontrolirane paljbe dolazi do velikog zagrijavanja i deformacije cijevi, što za posljedicu ima veliko rasipanje pogodaka. Zato za svako pojedino oružje postoji „režim paljbe“, koji je definiran kritičnom temperaturom. Kritična temperatura je ona temperatura nakon koje bi moglo doći do samoopaljenja ili prevelike deformacije cijevi. Kod oružja koje

ima velik broj ispaljenih hitaca u minuti (strojnice), spoj cijevi s kućištem izveden je tako da se cijev vrlo lako može odvojiti, te zamijeniti kako ne bi došlo do prekoračenja kritične temperature.



Slika 4. Ciljničke naprave [4]

Kod automatskog oružja cijevi su puno deblje nego što je potrebno s gledišta čvrstoće materijala. Razlog tome je bolje hlađenje cijevi. Na dijagramu (sl.5.) prikazane su promjene temperature za tri različite cijevi u ovisnosti o broju ispaljenih metaka.



Slika 5. Ovisnost porasta temperature o broju ispaljenih metaka[5]

Linijom (1) prikazana je tankostijena cijev hlađena vodom. Linijom (2) prikazana je tankostijena cijev hlađena zrakom, dok linija (3) prikazuje debelostijenu cijev koja se hladi slobodnom cirkulacijom zraka oko vanjske stijenke cijevi. Kod suvremenog oružja prosječni prirast temperature po ispaljenom metku iznosi 0,8-1,8 °C[5].

3. KONSTRUKCIJSKE ZNAČAJKE ISPITIVANOG STRELJAČKOG ORUŽJA

3.1. Jurišna puška „Zastava M-70“

„Zastava M-70“ jugoslavenska je kopija ruskog „AK-47“. Nastala je 1970. u „Zastavinim“ pogonima. Bravljenje se vrši na principu posudbe barutnih plinova. Iznad cijevi je smješten plinski cilindar s klipom koji je povezan sa zatvaračem puške. Pri kraju cijevi s gornje strane je izbušen mali provrt, te nakon što ispaljeno zrno prođe mjesto gdje je provrt izbušen, plinovi koji se nalaze iza njega počinju ulaziti u cilindar i guraju klip prema natrag. Zatvarač radi na principu „rotacije“. Rotacija je omogućena pomoću krivuljnog prigona, tako da se translacijsko gibanje klipa pretvara u rotacijsko gibanje zatvarača. Nakon što se zatvarač zakrene omogućeno mu je translacijsko gibanje, te je time proces odbravljivanja završen. U nastavku su prikazane karakteristike M-70 (tab. 1.), te različite inačice jurišne puške M-70 (sl. 6.)[6]

Tablica 1. Karakteristike jurišne puške M-70[6]

Karakteristika	Kalibar (mm)	Ukupna dužina (mm)	Dužina cijevi (mm)	Brzina zrna (m/s)	Masa oružja (kg)	Broj isp. zrna u minuti (met./min)	Tlak u cijevi (MPa)	Efikasan domet (m)
M-70	7,62x39	960	415	725	4,04	650	350	400

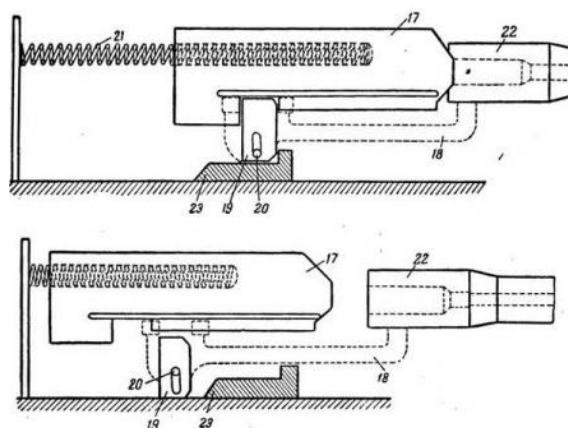


Slika 6. Različite inačice jurišne puške M-70[6]

3.2. Poluteška strojica „Browning M2“

Browning M2“ nastao je nakon I. svjetskog rata na temelju strojnice „M1919 Browning“ cal. .30-06 (7, 62 mm), također djela jednog od najvećih konstruktora oružja ikad Johna Mosesa Browninga. Osnovna razlika je u kalibru oružja. „Browning M2“ koristi puno veći i teži kalibar, te je stoga osim za živu silu namijenjen i za lakše oklopljena vozila, utvrde, te kao protuzrakoplovno oružje. Zbog svoje mase, većinom se smješta na vozila, tenkove, brodove i avione. Iako je nastao prije skoro stotinu godina, koristi se još i danas zbog savršenstva konstrukcije i pouzdanosti.

Što se tiče same konstrukcije, „M2“ ima zračno hlađenje cijevi, a punjenje se odvija pomoću „redenika“ u kojem je smješten puno veći broj metaka za razliku od klasičnog spremnika. Bravljenje radi na principu „kratkog trzaja cijevi“ (sl 7.).



Slika 7. Bravljenje „Browninga M2[7]

Nakon opaljivanja, cijev se zajedno s zatvaračem kreće nekoliko milimetara unatrag, te se nakon toga odvaja pomoću dijela za odbravljivanje, a zatvarač nastavlja put dok se opruga potpuno ne sabije. Nakon toga opruga potiskuje zatvarač prema naprijed, ubacujući novi metak u cijev. Razlog bravljenja, tj. povezivanja cijevi sa zatvaračem je brtvljenje plinova koji nastaju prilikom izgaranja baruta, sve do izlaska zrna iz cijevi. Kad bravljenja ne bi bilo, plinovi bi izlazili na stražnju stranu cijevi, čime bi došlo do velikog pada brzine zrna i mogućnosti ozljeđivanja strijelca. Na slici 8. prikazana je strojica „Browning M2“, dok su njene karakteristike prikazane u tablici 2[8].

Tablica 2. Karakteristika „Browninga M2“[8]

Karakteristika	Kalibar (mm)	Ukupna dužina (mm)	Dužina cijevi (mm)	Brzina zrna (m/s)	Masa oružja (kg)	Broj isp. zrna u minuti (met./min)	Tlak u cijevi (MPa)	Efikasan domet (m)
Browning M2	12,7x99	1654	1143	890	38	635	378	1800



Slika 8. Poluteška strojica „Browning M2“[8]

3.3. Teška strojica „KPV 14,5 mm“

„KPV 14,5 mm“ konstruiran je za vrijeme 2. svjetskog rata 1944.g. u sovjetskom savezu. Prva verzija bila je „KPV 14,5 mm“ i bila je namijenjena isključivo za primjenu kod pješništva. „KPV“ je za razliku od „KPV“-a namijenjen za montažu na oklopna vozila ili plovila, te kao protuzrakoplovno oružje. Kad se koristi kao protuzrakoplovno oružje, zbog veće učinkovitosti na postolju su montirane četiri strojnice koje rade istovremeno. „KPV“ se koristi za lakše oklopljena vozila i utvrde, te protuzrakoplovnu obranu.

Bravljenje radi na principu „kratkog trzaja cijevi“ kao i kod „M2“. U ovom slučaju nema dijela za odbravlivanje kao kod „M2“, već je zatvarač sličan onome kod M-70, tj. radi na principu rotacije. „KPV“ ima zračno hlađenje cijevi, a punjenje se odvija pomoću redenika od 40 ili 50 metaka. Postoje eksplozivna i pancirna zrna, a energija koju oslobađaju

pri udaru je oko 2 puta veća nego kod kalibra 12,7 mm. U nastavku su prikazani „KPVT“ kao protuzrakoplovno oružje(sl.9), te karakteristike „KPVT“-a (tab.3.)[9]

Tablica 3. Karakteristike „KPVT“-a[9]

Karakteristika	Kalibar (mm)	Ukupna dužina (mm)	Dužina cijevi (mm)	Brzina zrna (m/s)	Masa oružja (kg)	Broj isp. zrna u minuti (met./min)	Tlak u cijevi (MPa)	Efikasan domet (m)
KPVT	14,5x114	1980	1346	1005	49	600	360	3000

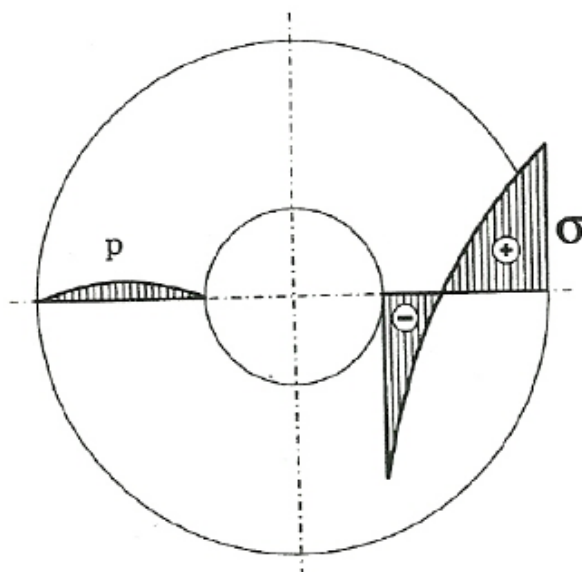


Slika 9. Teška strojica „KPVT 14,5 mm“[10]

4. KONSTRUKCIJSKE ZNAČAJKE, MATERIJAL I GLAVNI DIJELOVI CIJEVI ISPITIVANOG STRELJAČKOG ORUŽJA

4.1. Konstrukcijske značajke cijevi

Za razliku od topničkog oružja, svako streljačko oružje ima jednodijelne cijevi. Razlog tome je što tlak u cijevi topničkog oružja može biti više nego 10 puta veći za razliku od klasičnog oružja. Jednodijelne cijevi mogu biti neojačane i ojačane (samoojačane). Proces samoojačanja najčešće se provodi pomoću visokog hidrauličkog tlaka (autofretaža). Cijev se zatvori sa obje strane, te se unutarnja stijenka izlaže visokom hidrauličkom tlaku. Taj tlak je veći od granice elastičnosti materijala, pa po presjeku cijevi dolazi do plastične deformacije, tj. povećanja čvrstoće. Kada bi se takva cijev ponovno izložila djelovanju tlaka, tj. ispaljivanju projektila, nove deformacije neće nastupiti sve dok je tlak barutnih plinova niži od tlaka autofretaže. Na slici 10. prikazana su zaostala naprezanja σ i tlak p koji djeluju pri mirovanju cijevi[1].



Slika 10. Raspodjela tlaka p i naprezanja σ na presjeku samoojačane cijevi nakon rasterećenja[1]

Što se tiče konstrukcijskih značajki cijevi, ono najčešće ovisi o korištenom streljivu, tj. o veličini nastalog tlaka u cijevi. Kod većih kalibara su potrebna i veća barutna punjenja, pa je i tlak u cijevi veći. Prema nastalom tlaku se oblikuju debljine stijenke cijevi uz određeni

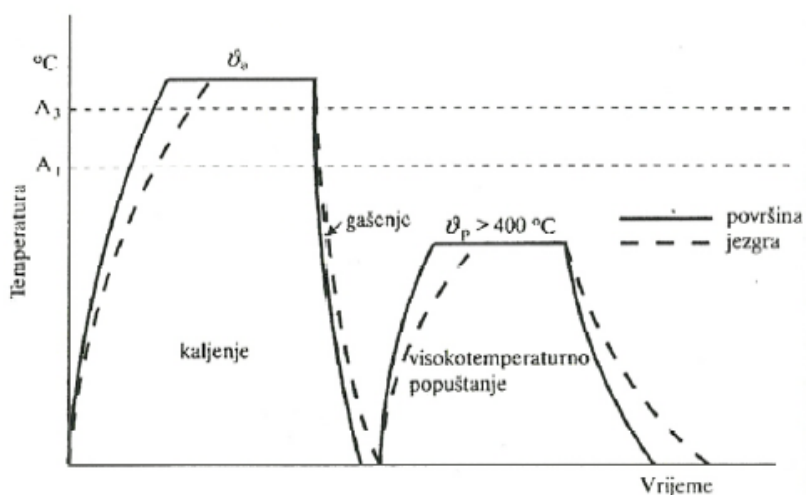
faktor sigurnosti, kako ni u jednom trenutku ne bi došlo do pojave plastične deformacije materijala. Kod oružja koje će se ovdje razmatrati, zbog ne prevelikog nastalog tlaka, cijevi su jednodijelne-neojačane.

4.2. Materijal cijevi

Cijev streljačkog oružja je konstrukcijski dio koji je istodobno izložen vrlo visokom tlaku i temperaturi, stoga je prvi zadatak pri konstrukciji odabir materijala cijevi. Za izradu cijevi se koriste kvalitetni legirani čelici, a svojstva koja moraju posjedovati su sljedeća:

- visoka čvrstoća i granica tečenja;
- dobra žilavost;
- dovoljna tvrdoća i visoka otpornost na udarna opterećenja i trenje;
- homogena struktura s malo nemetalnih uključaka;
- visoka otpornost na kemijsko djelovanje produkata izgaranja baruta i na
- djelovanje atmosfere;
- visoka udarna radnja loma [1].

Kako se vatreno oružje primjenjuje u vanjskom okolišu, te cijev nije moguće zaštititi od ekstremnih uvjeta različitih podneblja, potrebno je odabrati materijal čija se svojstva ne mijenjaju s promjenom vanjske temperature ili da su promjene vrlo male. Visoke vanjske temperature nisu dovoljno visoke da bi utjecale na svojstva takvih materijala, ali niske temperature koje se mogu spustiti ispod $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, mogu itekako utjecati na krhkost materijala i može doći do puknuća cijevi. Zbog takvih se okolnosti primjenjuju čelici za poboljšavanje čija se toplinska obrada sastoji od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja (sl. 11.). Primjeri takvih čelika su 30CrMoV9, 30CrNiMo8 i 30NiCrMo16. Čelici za poboljšavanje najčešće sadrže između 0,25-0,6% ugljika. Sadržaj ugljika u čeliku utječe na zakaljivost, a udio legiranih elemenata utječe na prokaljivost. Zakaljivost je svojstvo čelika da se gašenjem s temperature austenitizacije postigne što veća tvrdoća na površini materijala. Prokaljivost je svojstvo čelika da poprimi što jednoličniju tvrdoću po poprečnom presjeku materijala[1]

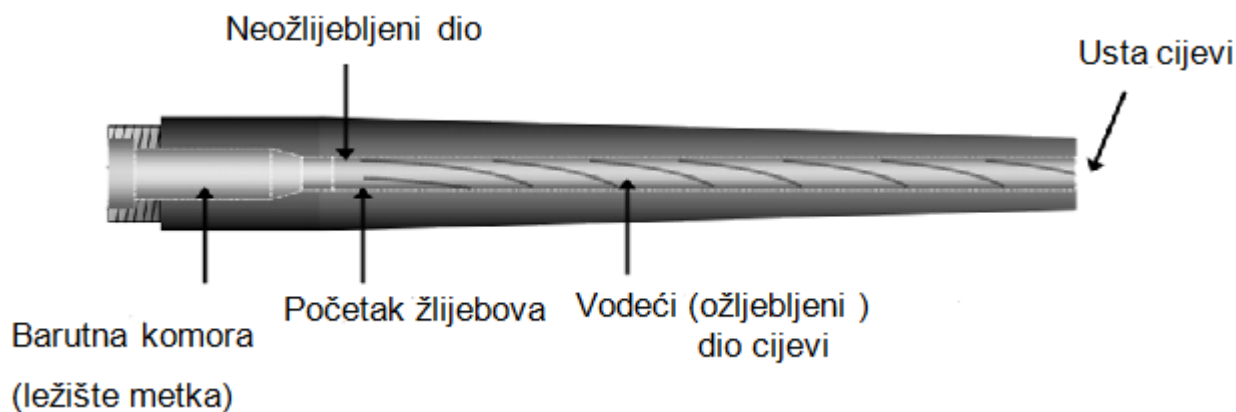


Slika 11. Postupak poboljšavanja čelika[11]

4.3. Glavni dijelovi cijevi

Glavni dijelovi cijevi ručnog vatrenog oružja su sljedeći:

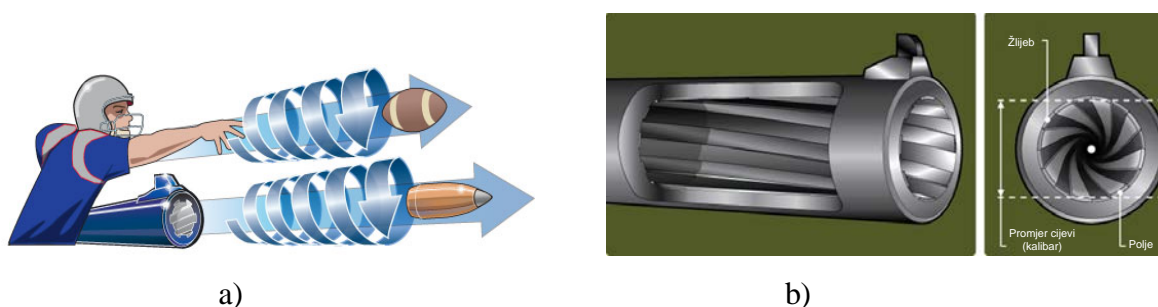
- **barutna komora** (ležište metka),
- **vodeći dio cijevi** (sl. 12).



Slika 12. Glavni dijelovi cijevi[12]

Barutna komora - u barutnu komoru se smješta čahura u kojoj se nalazi barutno punjenje. Ovisno o potrebnoj brzini zrna, tj. namjeni, koriste se različite mase i vrste baruta. Kod pješačkog oružja, vanjski promjer čahure je obično za 0,2 mm manji od promjera barutne komore.

Vodeći dio cijevi - kada se kao projektil koristi pojedinačno zrno, vodeći dio je ožljebljen (sl.13.b). Žljebljenjem se postiže rotacija zrna oko vlastite osi i dobiva učinak žiroskopa, tj. stabilnost u letu, a takav se princip koristi i prilikom izbacivanja „rugby“ lopte (sl. 13.a). Ako se kao projektil koristi sačma, vodeći dio je gladak. Kod automatskog oružja, a takvo će se ovdje obrađivati, vodeći dio je uvijek ožljebljen.



Slika 13. Prikaz cijevi ručnog vatrenog oružja[13]

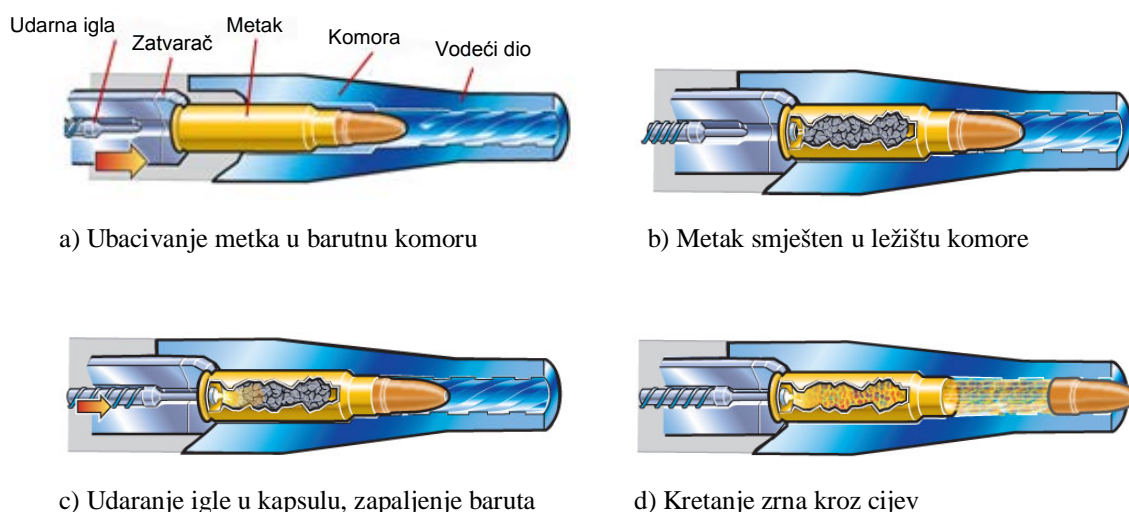
a) efekta žiroskopa b) presjek ožljebljene cijevi

Glavni dijelovi cijevi ručnog vatrenog oružja razlikuju se od topničkih u jednom detalju, a to je prijelazni konus. Budući da su topnički projektili puno veći od puščanih, potrebna je i puno veća sila prilikom urezivanja projektila, tj. vodećeg prstena u žljebove. Kod klasičnog oružja ta sila nije velika, te zato nema potrebe za izradom prijelaznog konusa.

5. ZNAČAJKE PROCESA OPALJENJA I UGRIJAVANJA CIJEVI VATRENOG ORUŽJA

5.1. Značajke procesa opaljenja

Barut koji je smješten u čahuri posjeduje kemijsku energiju. Prilikom udara igle (koja je smještena u zatvaraču) u kapsulu na dnu čahure, dolazi do zapaljenja baruta, te pretvorbe kemijske energije u toplinsku. Dolazi do naglog porasta tlaka unutar čahure, te on počinje jednako djelovati na sve stijenke čahure i na dno zrna koje je utisnuto u čahuru. Kad sila nastalog tlaka postane veća od sile trenja koja se suprotstavlja kretanju zrna, zrno se počinje kretati. Budući da nakon početka kretanja zrna sav barut još nije izgorio, tj. i dalje izgara, tlak se nastavlja povećavati, a pritom dolazi i do porasta brzine zrna. Na ustima cijevi zrno još neko vrijeme ubrzava zbog djelovanja tlaka, te nakon toga počinje opadati. Brzina na ustima cijevi naziva se još *početna brzina zrna* v_0 . Ovaj proces detaljnije je prikazan na slici 14, a-d.



Slika 14. Proces opaljenja u cijevi[14]

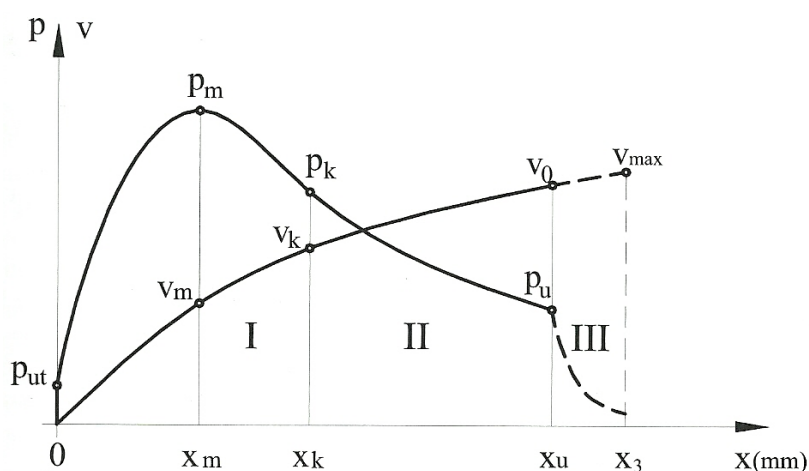
- a) Ubacivanje metka u barutnu komoru, b) Metak smješten u ležištu komore,
c) Udaranje igle u kapsulu, zapaljenje barut, d) Kretanje zrna kroz cijev

Proces opaljenja može se podijeliti na nekoliko faza:

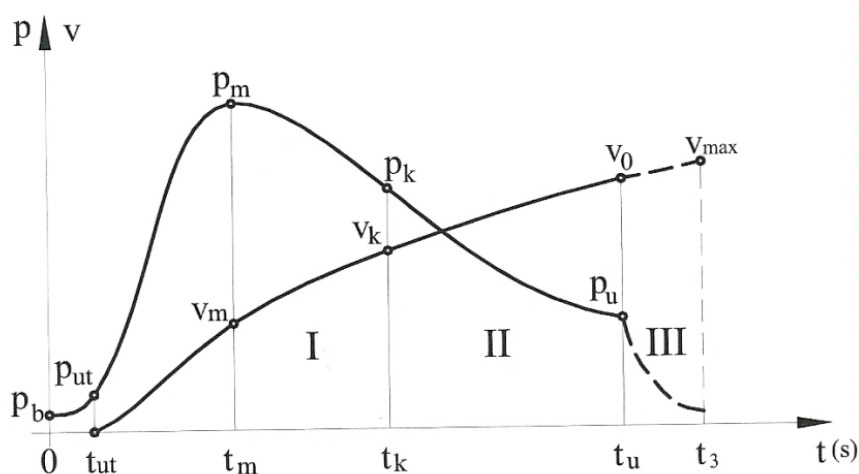
- *prethodna faza*- traje od početka izgaranja barutnog punjenja do početka kretanja zrna;
- *prva ili temeljna faza*- traje od početka kretanja zrna u cijevi do potpunog izgaranja barutnog punjenja;

- *druga faza*- koja traje od završetka izgaranja barutnog punjenja do izlaska zrna iz cijevi;
- *treća faza*- predstavlja razdoblje nakon djelovanja barutnih plinova na zrno i oružje, a traje od trenutka izlaska zrna iz cijevi do prestanka djelovanja barutnih plinova na zrno i cijev oružja[1]

Tijekom izgaranja barutnog punjenja, tlak p barutnih plinova i brzina kretanja zrna v_0 mijenjaju se u ovisnosti od prijeđenog puta x zrna i vremena t . Zakonitosti ovih promjena prikazane su grafički na slikama 15. i 16.



Slika 15. Ovisnost tlaka barutnih plinova p i brzine v o prijeđenom putu x zrna[1]



Slika 16. Ovisnost tlaka barutnih plinova p i brzine v o vremenu kretanja zrna t [1]

U *prethodnoj fazi* procesa opaljenja udarni mehanizam pripaljuje barutno punjenje inicijalne kapsule. Barutni plinovi pripale zagrijavaju glavno punjenje na temperaturu zapaljenja. Tlak pripaljivanja označen je sa p_b na slici 14. Dok tlak ne dostigne vrijednost p_{ut} , izgaranje se odvija u konstantnom volumenu. Tlak p_{ut} naziva se tlakom utiskivanja zrna, a iznosi onoliko koliko je potrebno da se košuljica zrna utisne u žljebove cijevi.

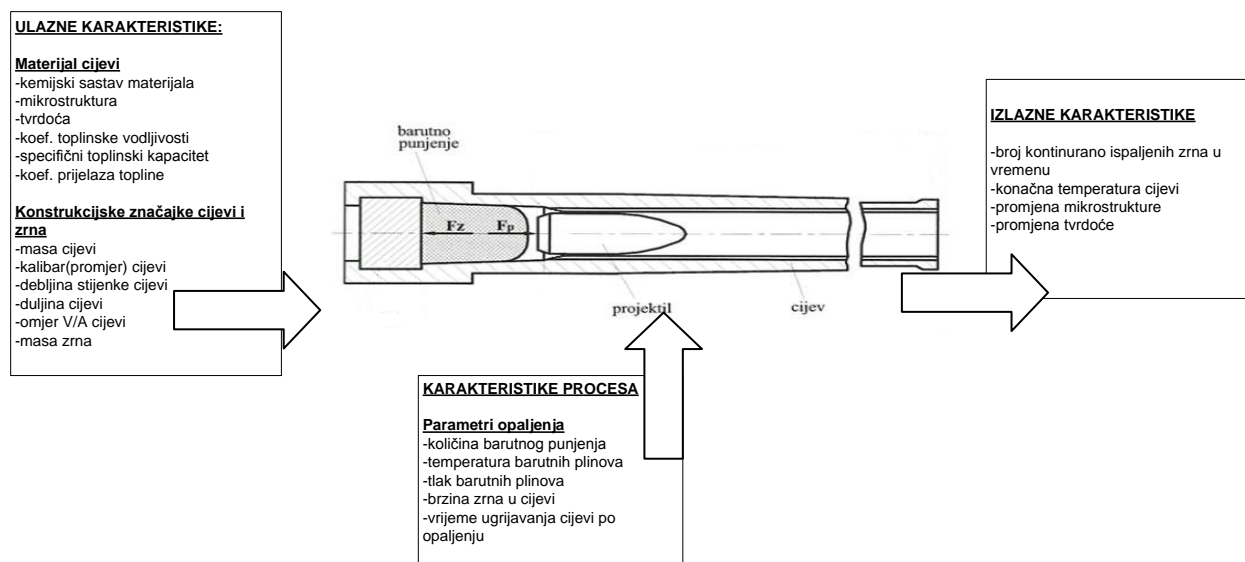
U *prvoj fazi* počinje kretanje zrna kroz cijev. Na početku prve faze brzina zrna je relativno mala, pa se količina plinova povećava brže nego što se povećava prostor za njihovo širenje. Zbog toga tlak plinova raste i doseže maksimalnu vrijednost u trenutku tlaka p_m , tj. kada se izjednači brzina razvijanja plinova s brzinom povećanja njihovog volumena. Vrijednost tlaka p_m , jedna je od temeljnih veličina unutarnje balistike, jer mora stvoriti određenu početnu brzinu projektila, a da pritom ne dođe do plastične deformacije cijevi.

Druga faza počinje po završetku izgaranja barutnog punjenja, tj. kada prestaje stvaranje novih plinova. Plinovi koji su stvoreni za vrijeme izgaranja imaju veliku unutarnju energiju koja se pretvara u rad kretanja zrna. U tom trenutku visina tlaka jednaka je tlaku p_k i pada do vrijednosti p_u na ustima cijevi. Na toj vrijednosti tlaka, brzina zrna jednaka je brzini v_0 .

Treća faza procesa opaljenja počinje u trenutku kada projektil napusti cijev. Plinovi koji naglo izlaze iz cijevi još uvijek stvaraju potisak na dno projektila i ubrzavaju ga. Svoju maksimalnu brzinu projektil ima na udaljenosti x_3 ispred usta cijevi, i nakon toga brzina počinje opadati[1].

5.2. Značajke procesa ugrijavanja cijevi

Sustav u kojem se odvija proces opaljenja, tj. ugrijavanja cijevi sastoji se od tri glavna dijela, a to su cijev, projektil i barutno punjenje. Svaki od ta tri dijela sadrži nekoliko parametara koji izravno utječu na sam proces. Kako bi se što točnije opisao sam model, potrebno je prepoznati i uključiti u proces što veći broj parametara koji na njega utječu. Na slici br. 17. prikazani su utjecajni parametri na proces ugrijavanja cijevi.

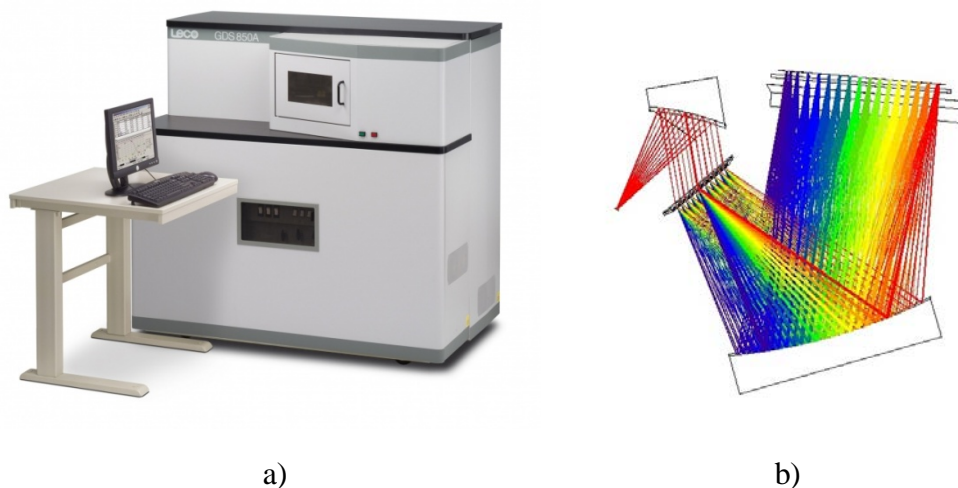


Slika 17. Utjecajni parametri procesa ugrijavanja cijevi

Parametri koji su navedeni kao ulazne karakteristike su zapravo konstantni, tj. definirani su izradom samog oružja. To su npr. materijal, masa, duljina, debljina stijenke cijevi, itd. Parametri koji ulaze u karakteristike procesa, tj. parametri opaljenja su promjenjivi parametri. Većinom su svi parametri opaljenja definirani barutnim punjenjem. Ovisno o količini barutnog punjenja dolazi do promjena tlaka i temperature u cijevi, te do promjene brzine zrna. Količina barutnog punjenja ovisi o namjeni oružja, tj. o potrebnom dometu, te energiji zrna na cilju. Različitim kombinacijama barutnih punjenja i mase zrna postižu se različiti učinci pri pogotku. Naravno postoji ograničenje tih kombinacija, a postavlja ih cijev oružja, tj. mehanička svojstva materijala cijevi. Prilikom zagrijavanja cijevi dolazi do pada mehaničkih svojstava materijala, od kojih je ovdje najbitnija tvrdoća jer ona uvjetuje trošenje cijevi. U poglavlju 7. biti će detaljnije opisan proces ugrijavanja na konkretnom čeliku, budući da ugrijavanje ovisi o svojstvima samog materijala.

6. KEMIJSKA ANALIZA MATERIJALA CIJEVI

Kemijski sastav uzoraka cijevi dobiven je pomoću metode optičke emisijske spektrometrije, na uređaju spektrometar GDS 850 Leco. Princip rada ovog uređaja je sljedeći: atomi ispitivanog uzorka pobuđuju se energijom koju u obliku iskre izbacuje elektroda iznad uzorka. Energija iskre uzrokuje da elektroni koji se nalaze u atomima pojedinih elementa emitiraju svjetlost koja se pomoću određenog pretvarača pretvara u određeni svjetlosni spektar. Svaki pojedini intenzitet određenog spektra određuje drugi kemijski element. Mjerenjem intenziteta vrhova u dobivenom spektru moguće je dobiti vrlo visoku točnost kvantitativne ili kvalitativne analize. Na slici 18. prikazani su uređaj GDS 850 Leco, te princip pretvorbe u svjetlosne spektre.



Slika 18 . Kemijska analiza uzoraka[15]

(a) Spektrometar GDS 850 LECO, (b) svjetlosni spektar

U nastavku su tablicom br. 4 prikazani rezultati kemijske analize ispitivanih uzoraka.

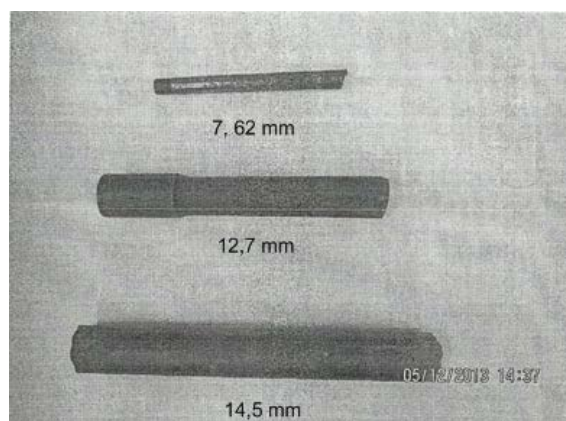
Tablica 4. Rezultati kemijske analize

Oznaka uzorka	%									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V
14,5 mm	0,32	0,44	0,46	0,004	0,005	0,80	2,08	0,27	0,21	0,16
12,7 mm	0,40	0,29	0,90	0,009	0,016	1,10	0,12	0,65	0,22	0,26
7,62 mm	0,65	0,42	0,60	0,028	0,031	0,74	0,13	0,03	0,19	0,20

7. METALOGRAFSKA ANALIZA I ISPITIVANJE TVRDOĆE UZORAKA

7.1. Priprema uzoraka za metalografsku analizu

Radi potrebnih ispitivanja, iz dotrajalih cijevi vatrenog oružja (sl.19.) koje je prethodno opisano izrezani su uzorci po poprečnom presjeku cijevi. Prilikom rezanja uzorci su hlađeni rashladnom tekućinom kako ne bi došlo do promjena u mikrostrukтури čelika.



Slika 19. Dijelovi dotrajale cijevi

Izrezani uzorci poredani po veličini kalibra prikazani su na slici 20.



Slika 20. Izrezani uzorci iz cijevi vatrenog oružja

Iz svake cijevi izrezano je po 6 uzoraka. Pet uzoraka iz svake cijevi bilo je zagrijavano redom od 600-1000°C, te su nakon toga hlađeni na zraku. Tim postupkom oponašan je stvaran proces ugrijavanja koji se odvija u cijevi prilikom opaljenja, pa sve do potpunog

ohlađivanja cijevi, u uvjetima intenzivnog režima opaljivanja. Šesti uzorak nije bio zagrijavan kako bi se u konačnici mogli donijeti zaključci o mikrostrukturnim promjenama koje nastaju zbog pregrijavanja cijevi. Nakon što se uzorci izrežu iz cijevi i toplinski obrade, potrebno ih je pripremiti za daljnju analizu. Uzorci se zalijevaju u polimernu masu radi lakšeg rukovanja (sl. 21.). Kad se zaliju, uzorci se bruse kako bi se odstranili neželjeni slojevi (nečistoće, masti, oksidacija), te kako bi se površina uzoraka poravnala s površinom mase u koju su zaliveni. Predzadnji postupak pripreme je poliranje, čime se dobije još finije obrađena površina, a time i kvalitetnija metalografska snimka. Završni postupak pripreme je nagrivanje. Površina je nagravana NITALOM (otopina dušične kiseline u alkoholu) što je standardni postupak za čelike.



Slika 21. Uzorci zaliveni u polimernu masu

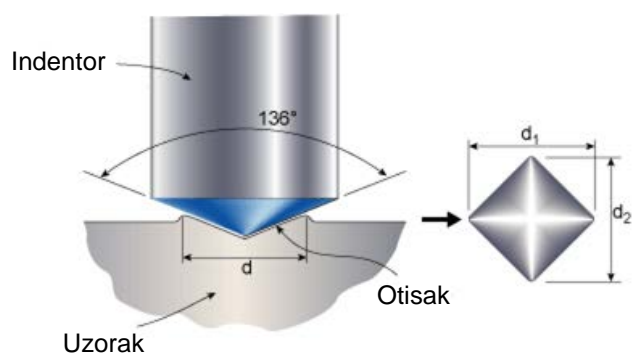
Metalografska analiza vršena je pomoću svjetlosnog mikroskopa tipa OLYMPUS BH-2 (sl. 22.) u laboratoriju za metalografsku analizu fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Prilikom snimanja uzoraka korištena su povećanja od x200 i x500 puta.



Slika 22. Mikroskop OLYMPUS BH-2[16]

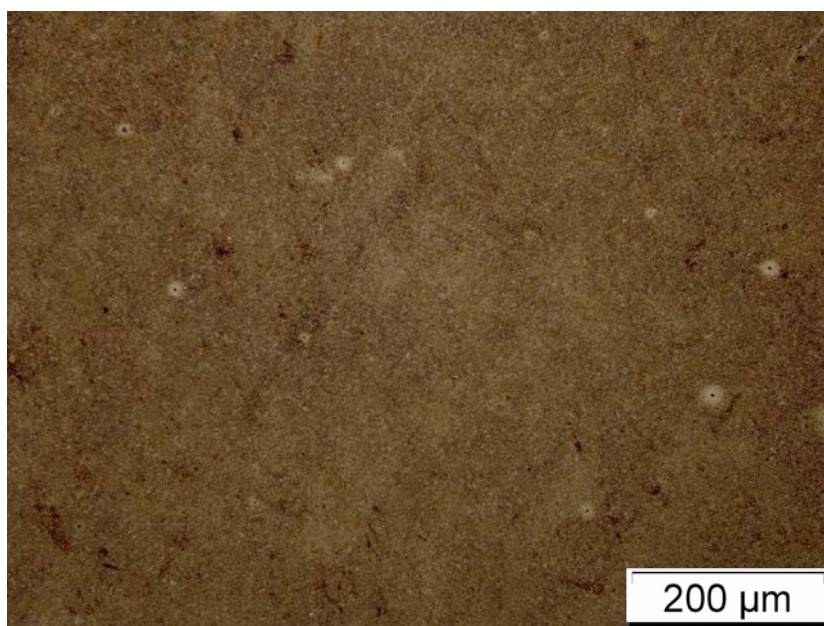
Također je mjerena i tvrdoća svakog uzorka pomoću Vickersove metode (sl.23). Djelovanjem utega mase 200 g (HV0,2) u uzorak se utiskuje indenter u obliku piramide. Na

temelju duljine dijagonale prizmatičnog oblika određuje se tvrdoća materijala. Tvrdoća pojedinog uzorka biti će navedena uz metalografsku snimku.

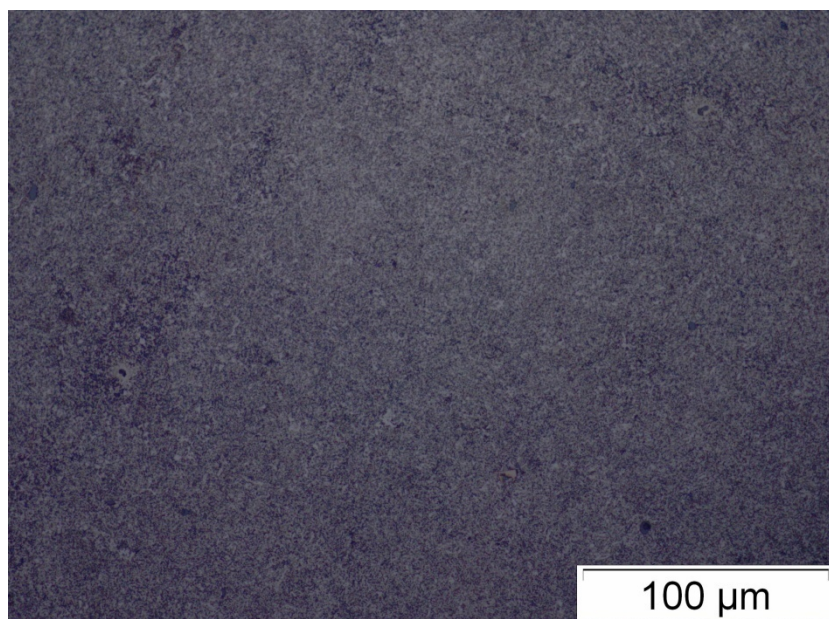


Slika 23. Mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom[17]

U nastavku su prikazane metalografske snimke nezagrijavanih uzoraka. Na slici 24. prikazani su uzorci kalibra 7, 62 mm pod povećanjima x200 i x500 puta. Tvrdoća ovog uzorka iznosi 338 HV0,2.



a)

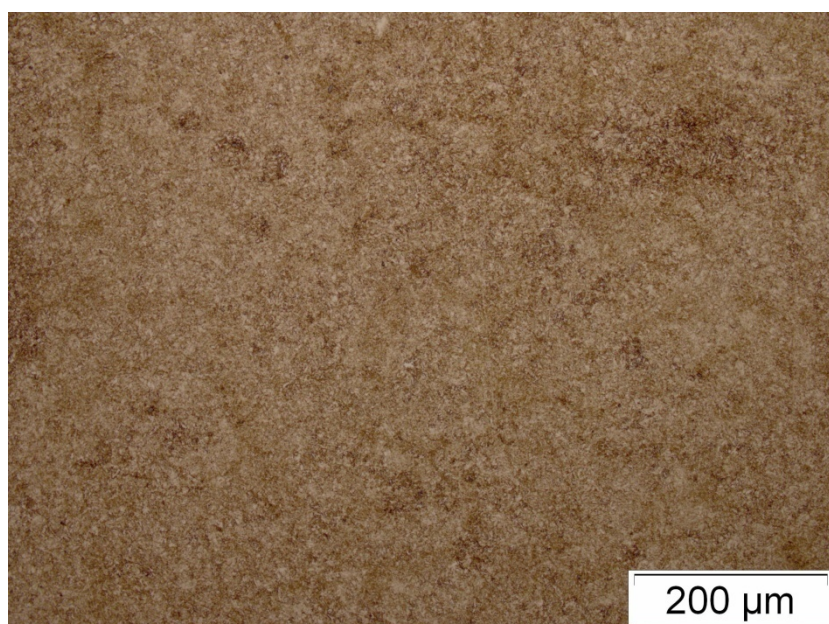


b)

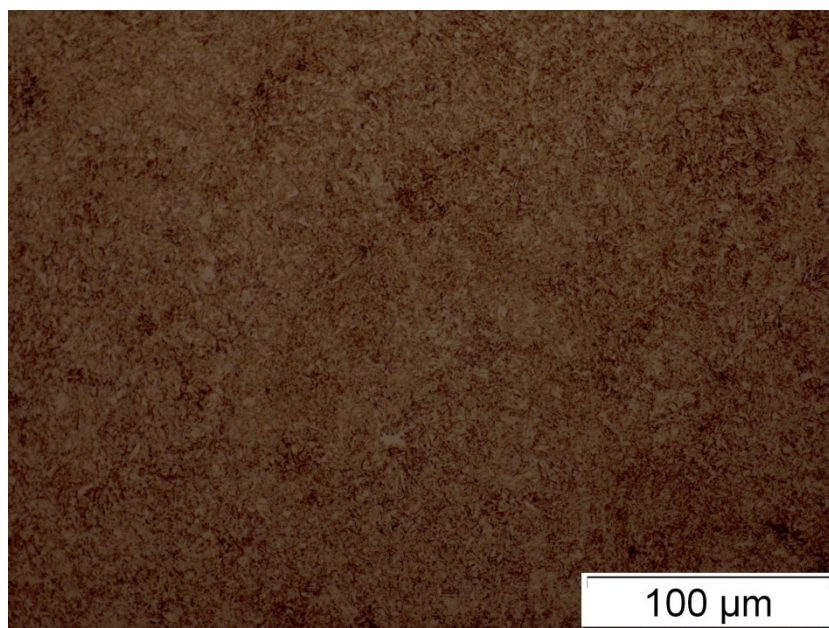
Slika 24. Metalografske snimke nezagrijavanog uzorka 7,62 mm

Povećanje: a) x200 puta b) x500 puta

Na slici 25. prikazani su uzorci kalibra 12,7 mm pod povećanjima x200 i x500 puta. Prosječna tvrdoća ovog uzorka iznosi 371 HV_{0,2}.



a)

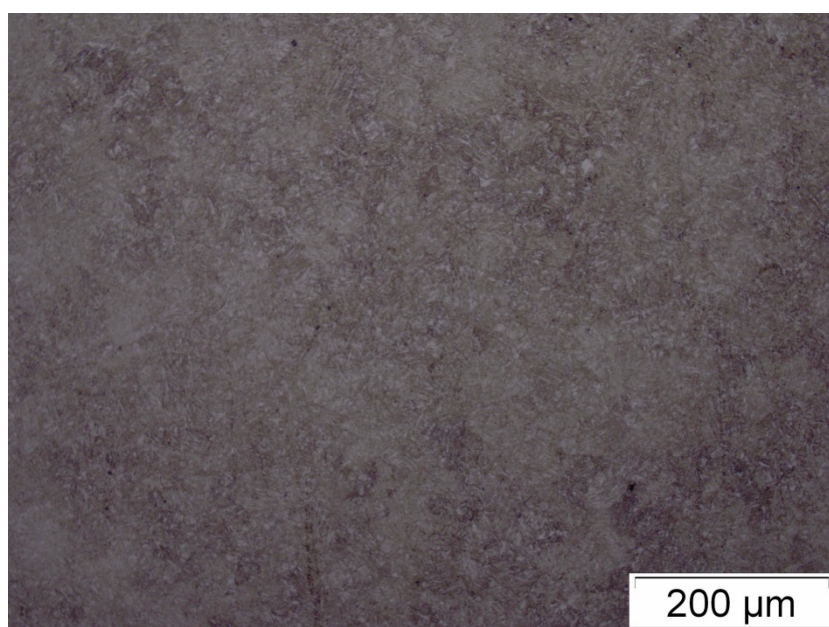


b)

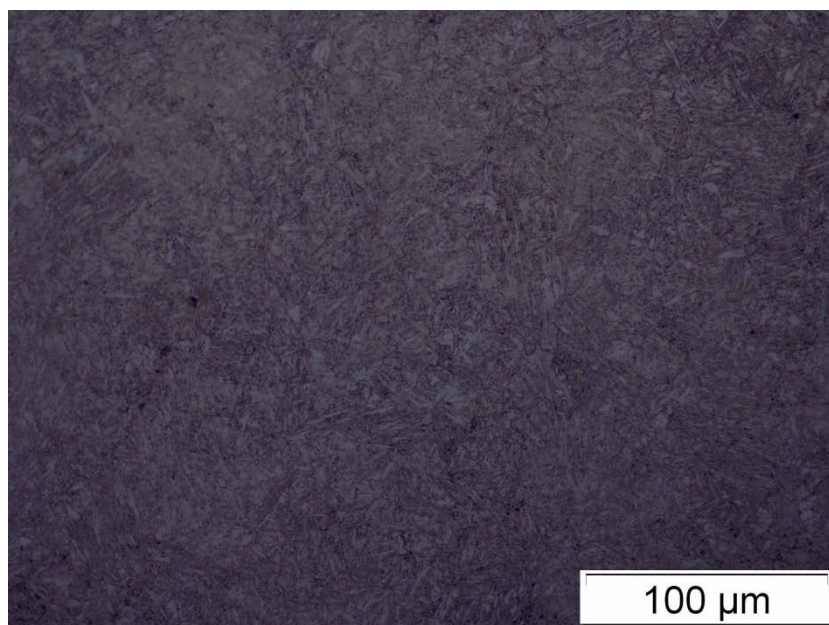
Slika 25. Metalografske snimke nezagrijavanog uzorka 12,7 mm

Povećanje: a) x200 puta b) x500 puta

Na slici 26. prikazani su uzorci kalibra 14,5 mm pod povećanjima x200 i x500 puta. Prosječna tvrdoća ovog uzorka iznosi 443 HV_{0,2}.



a)



b)

Slika 26. Metalografske snimke nezagrijavanog uzorka 14,5 mm

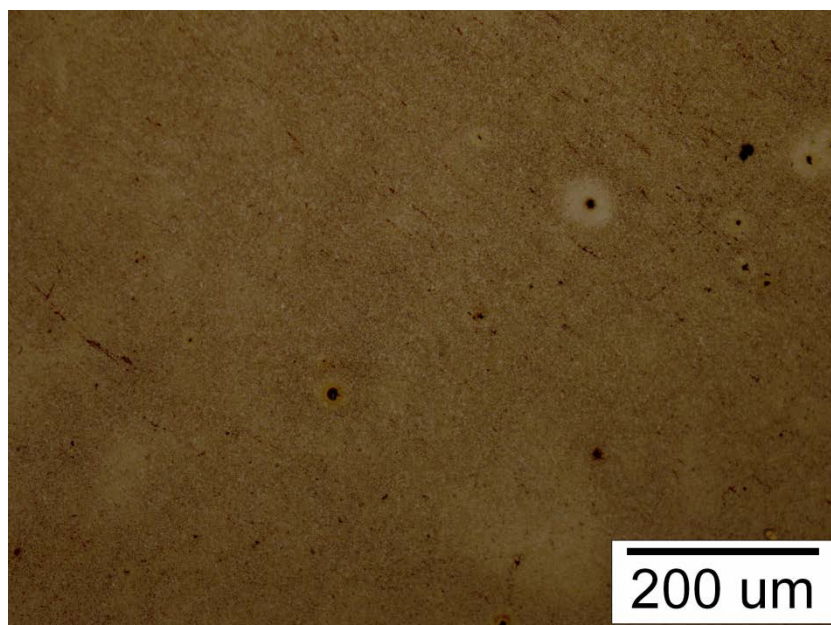
Povećanje: a) x200 puta b) x500 puta

Na svim metalografskim snimkama vidljiva je struktura popuštenog martenzita. Takva struktura postiže se kaljenjem, te popuštanjem čelika. Da se radi o popuštenom martenzitu pokazuje i prosječna tvrdoća svakog uzorka. Kod nekih uzoraka tvrdoća je veća dok je kod nekih manja, a razlog tome su različiti kemijski sastavi materijala, te različite temperature kaljenja i popuštanja materijala.

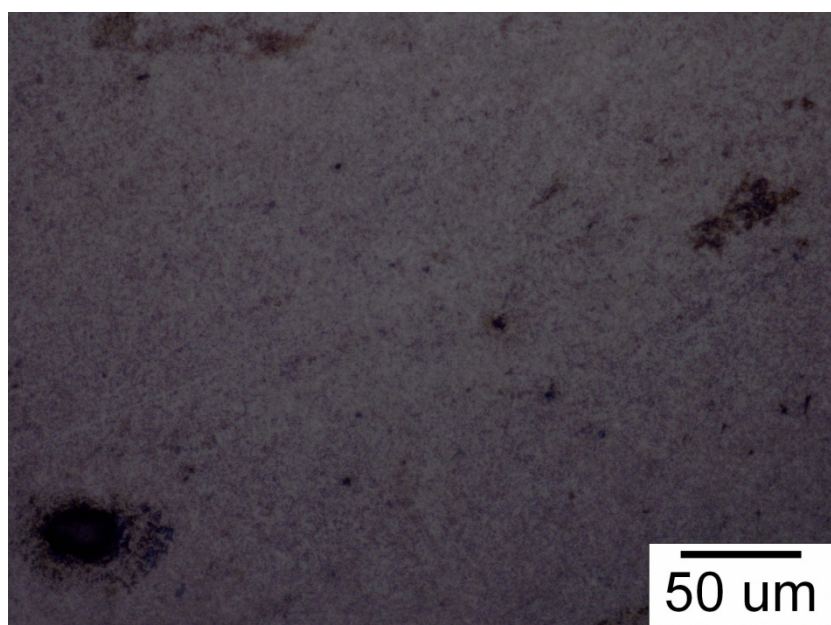
Nakon analize početnih, tj. toplinski ne obrađenih uzoraka, slijedi analiza „eksploatiranih“ uzoraka u svrhu utvrđivanja promjena nastalih pri simuliranoj eksploataciji.

7.2. Analiza uzorka 7,62 mm

Na slici 27. prikazani su uzorci kalibra 7,62 mm. Uzorak je ugrijavao kroz vrijeme od 1 h pri temperaturi od 600°C, te je nakon toga hlađen na zraku. Prosječna tvrdoća ovog uzorka iznosi 300 HV0,2.



a)

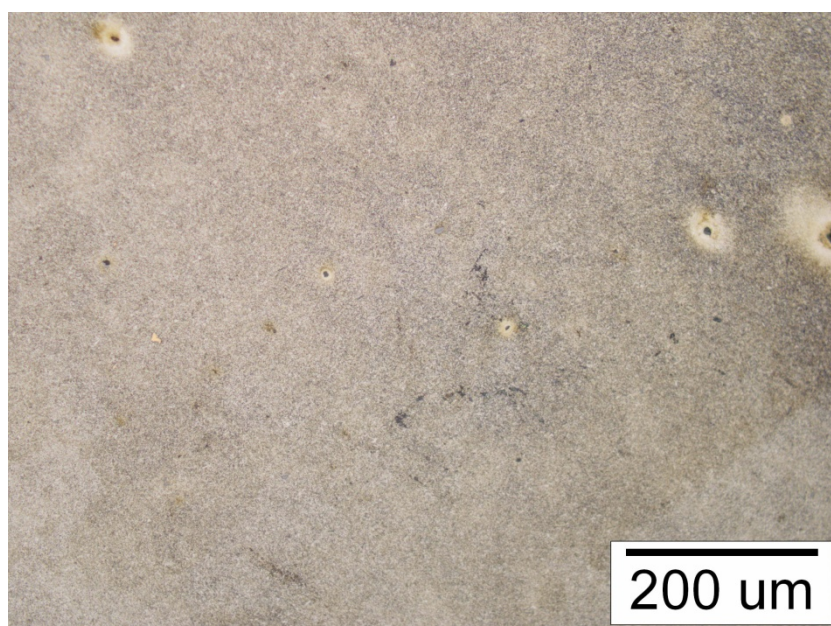


b)

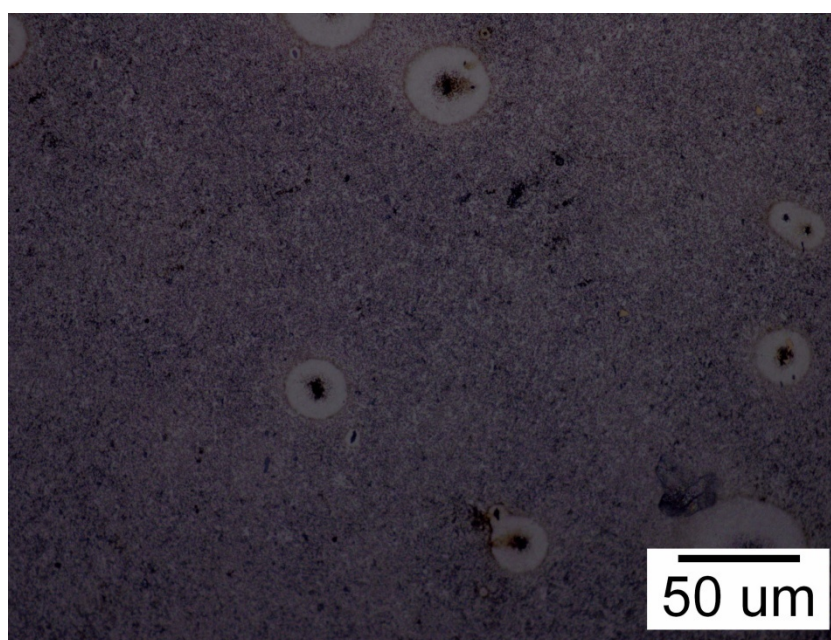
Slika 27. Metalografske snimke uzorka 7,62 mm ugrižavanog na 600°C

Povećanje: a) x200 puta b) x500 puta

Na slici 28. prikazani su uzorci kalibra 7,62 mm. Uzorak je ugrižavan kroz vrijeme od 1 h pri temperaturi od 700°C, te je nakon toga hlađen na zraku. Prosječna tvrdoća ovog uzorka iznosi 269 HV0,2.



a)

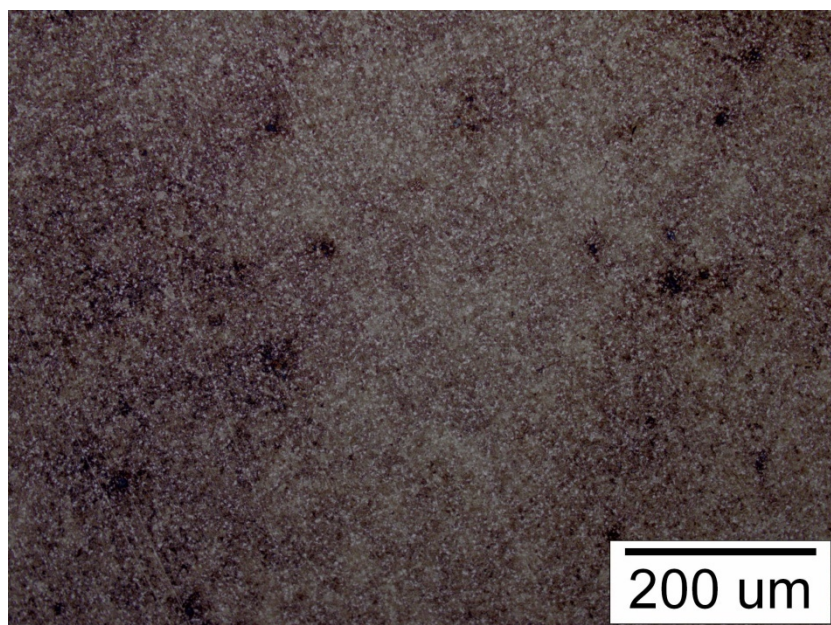


b)

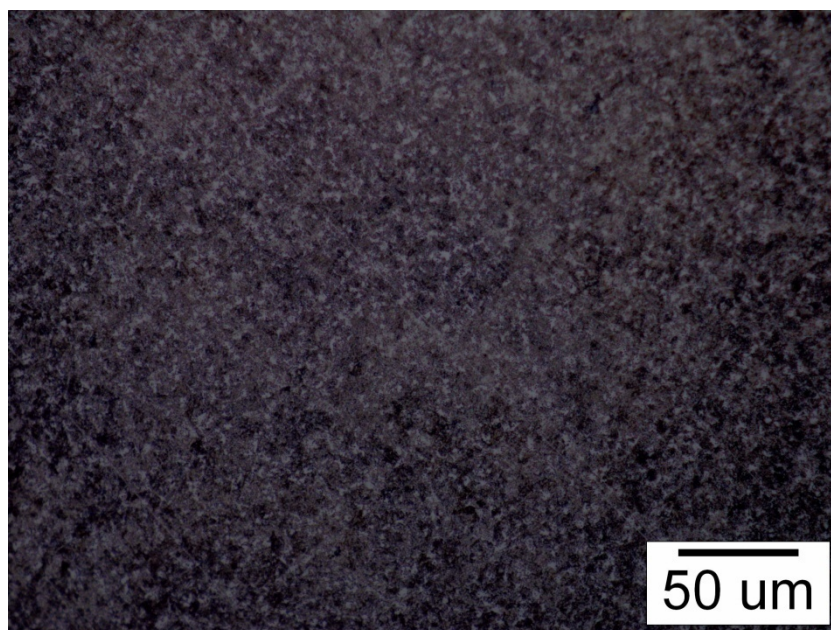
Slika 28. Metalografske snimke uzorka 7,62 mm ugrižavanog na 700°C

Povećanje: a) x200 puta b) x500 puta

Na slici 29. prikazani su uzorci kalibra 7,62 mm. Uzorak je ugrižavan kroz vrijeme od 1 h pri temperaturi od 800°C, te je nakon toga hlađen na zraku. Prosječna tvrdoća ovog uzorka iznosi 278 HV0,2.



a)

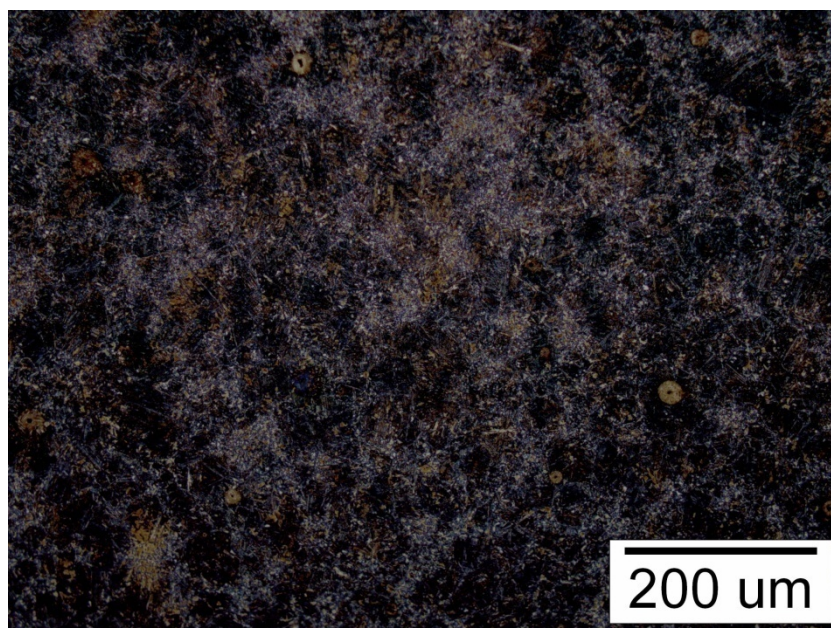


b)

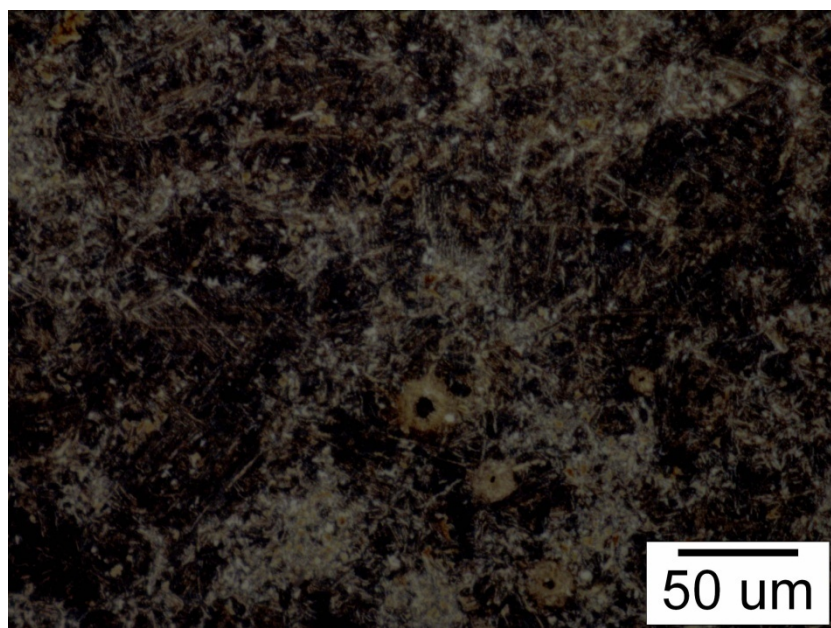
Slika 29. Metalografske snimke uzorka 7,62 mm ugrižanog na 800°C

Povećanje: a) x200 puta b) x500 puta

Na slici 30. prikazani su uzorci kalibra 7,62 mm. Uzorak je ugrižan kroz vrijeme od 1 h pri temperaturi od 900°C, te je nakon toga hlađen na zraku. Prosječna tvrdoća ovog uzorka iznosi 387 HV0,2.



a)

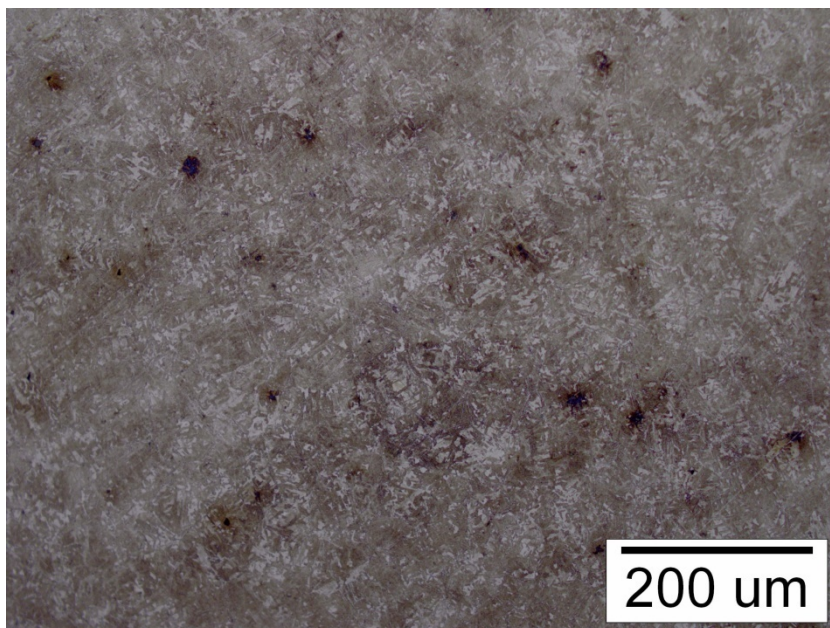


b)

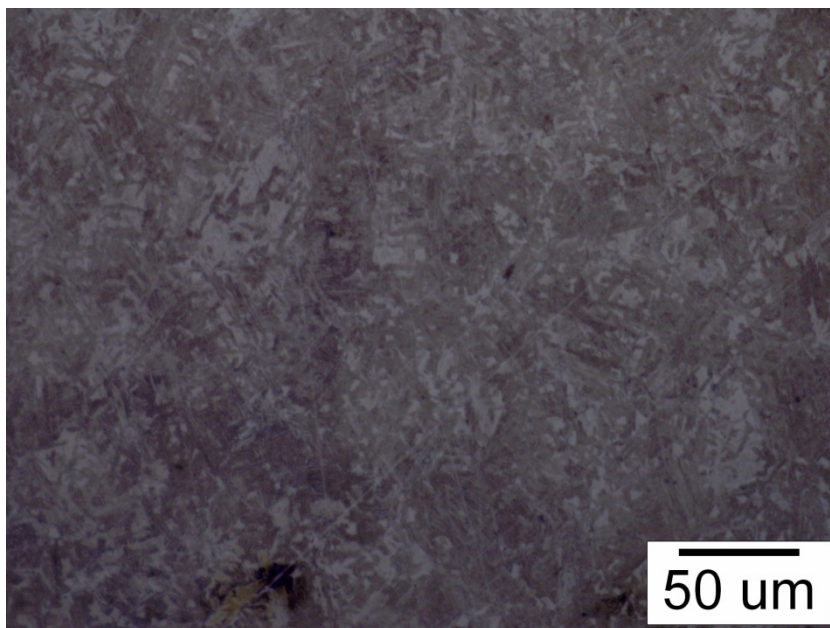
Slika 30. Metalografske snimke uzorka 7,62 mm ugrižavanog na 900°C

Povećanje: a) x200 puta b) x500 puta

Na slici 31. prikazani su uzorci kalibra 7,62 mm. Uzorak je ugrižavan kroz vrijeme od 1 h pri temperaturi od 1000°C, te je nakon toga hlađen na zraku. Prosječna tvrdoća ovog uzorka iznosi 340 HV0,2.



a)



b)

Slika 31. Metalografske snimke uzorka 7,62 mm ugrižavanog na 1000°C

Povećanje: a) x200 puta b) x500 puta

Nakon provedenog ispitivanja koje se sastojalo od mjerenja tvrdoće, određivanja kemijskog sastava, te metalografskog snimanja mikrostrukture uzorka 7,62 mm može se zaključiti sljedeće:

Uzorak 7,62 mm prema početnoj tvrdoći od 338 HV_{0,2}, kemijskom sastavu, te strukturi popuštenog martenzita spada u skupinu čelika za poboljšavanje, kaljen je i

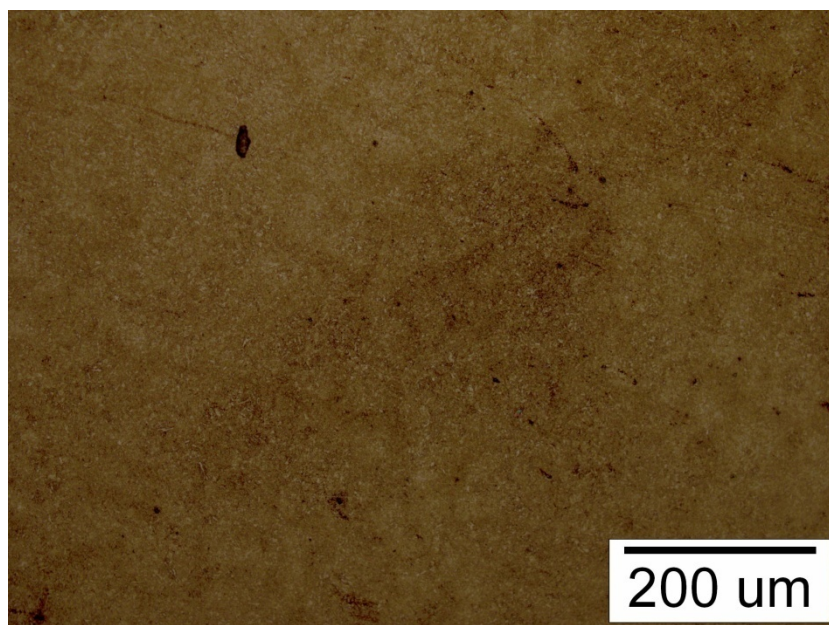
visokotemperaturno popušten. Po kemijskom sastavu, uzorak 7,62 mm najbliži je čeliku **40ChFA**.

Zagrijavanjem uzoraka na temperaturama od 600°-1000°C došlo je do sljedećih promjena:

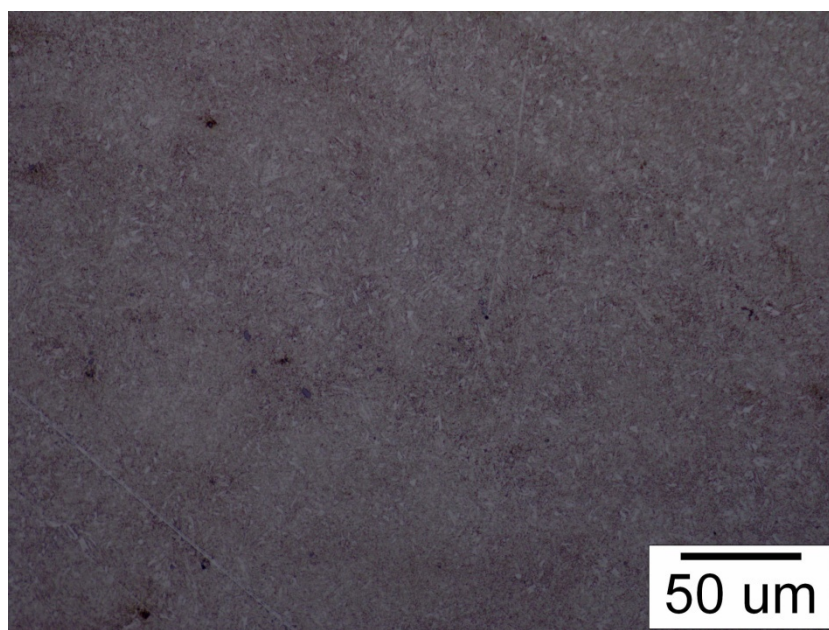
- temperature 600° i 700°C ne dosežu granicu A_1 , tj. temperaturu austenitizacije, pa se zadržava mikrostruktura popuštenog martenzita, ali zbog popuštanja dolazi do pada tvrdoće materijala,
- temperatura A_1 kod ovog čelika iznosi 745°C, tako da je pri 800°C dosegnuta granica austenitizacije
- popušteni martenzit se raspada na karbid popuštanja i ferit, te je došlo do malog porasta tvrdoće
- na temperaturi od 900°C dolazi do usitnjavanja zrna, te do znatnijeg porasta tvrdoće materijala, a takav postupak se još naziva i „normalizacijsko žarenje“
- pri temperaturi od 1000° dolazi do pogrubljenja zrna, te do malog pada tvrdoće materijala
- takav postupak toplinske obrade koristi se da bi se olakšala obrada odvajanjem čestica, a naziva se još i „žarenje na grubo zrno“

7.3. Analiza uzorka 12,7 mm

Na slici 32. prikazani su uzorci kalibra 12,7 mm. Uzorak je ugrižavan kroz vrijeme od 1 h pri temperaturi od 600°C, te je nakon toga hlađen na zraku. Korištena. Prosječna tvrdoća ovog uzorka iznosi 352 HV0,2.



a)

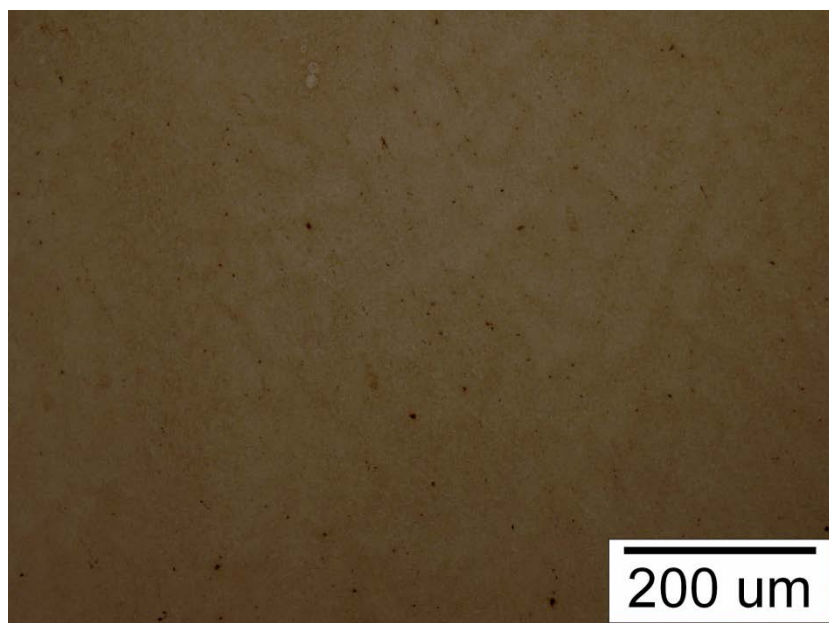


b)

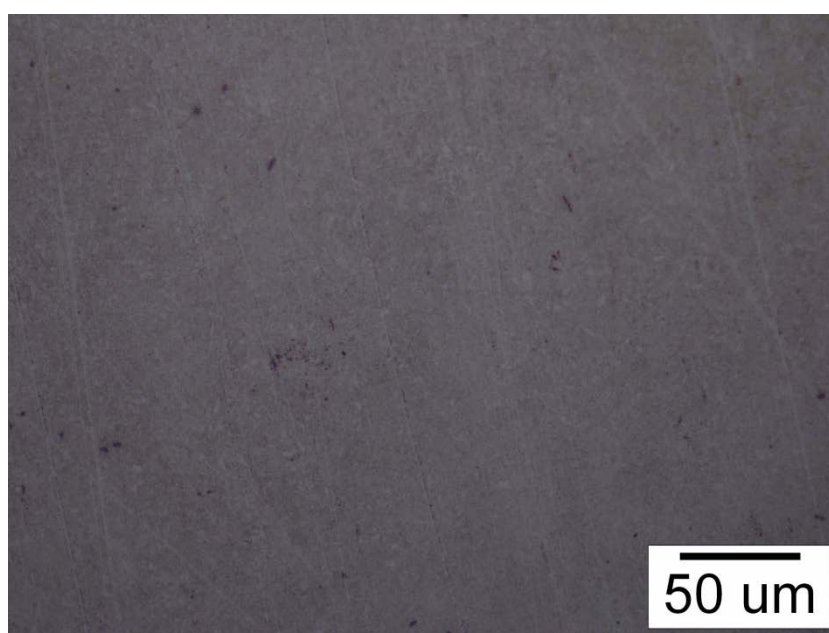
Slika 32. Metalografske snimke uzorka 12,7 mm ugrižavanog na 600°C

Povećanje: a) x200 puta b) x500 puta

Na slici 33. prikazani su uzorci kalibra 12,7 mm. Uzorak je ugrižavan kroz vrijeme od 1 h pri temperaturi od 700°C, te je nakon toga hlađen na zraku. Prosječna tvrdoća ovog uzorka iznosi 283 HV_{0,2}.



a)

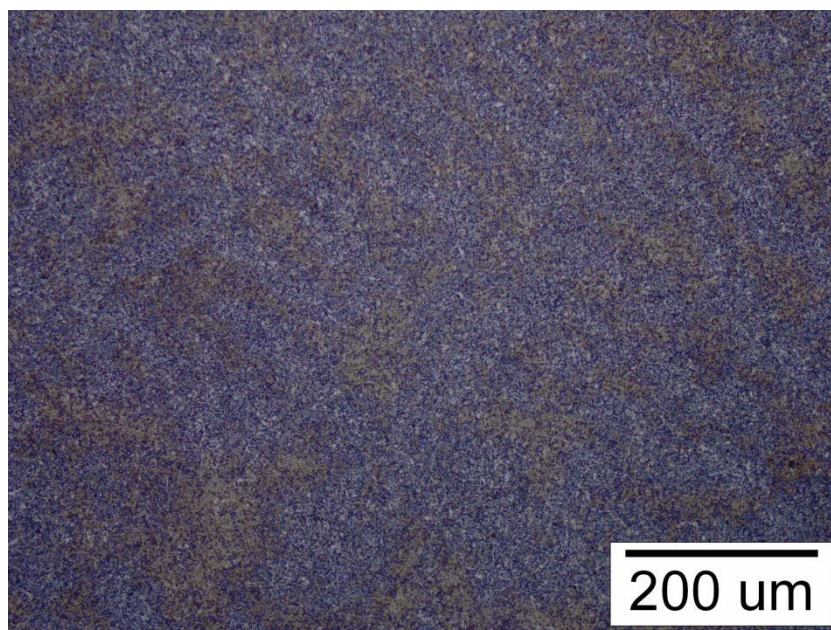


b)

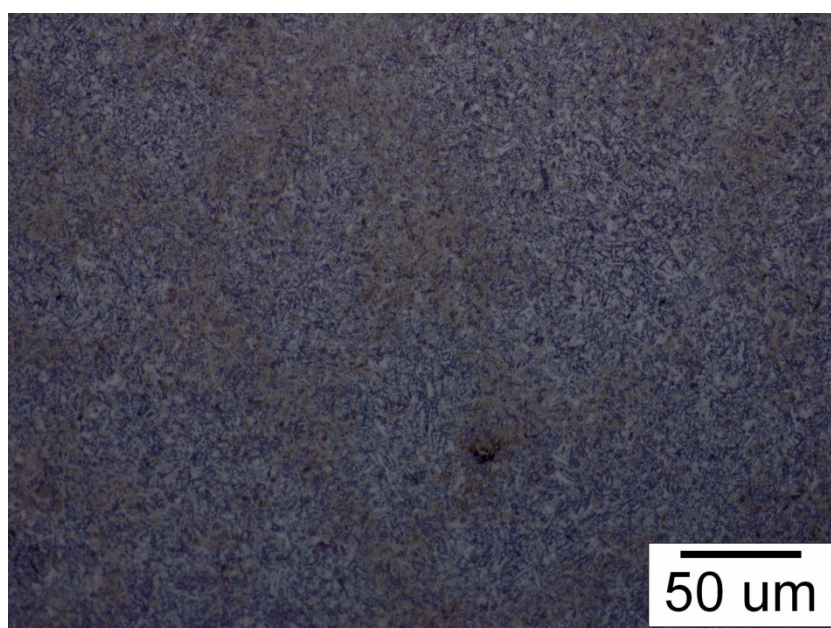
Slika 33. Metalografske snimke uzorka 12,7 mm ugrižanog na 700°C

Povećanje: a) x200 puta b) x500 puta

Na slici 34. prikazani su uzorci kalibra 12,7 mm. Uzorak je ugrižan kroz vrijeme od 1 h pri temperaturi od 800°C, te je nakon toga hlađen na zraku. Prosječna tvrdoća ovog uzorka iznosi 450 HV0,2.



a)

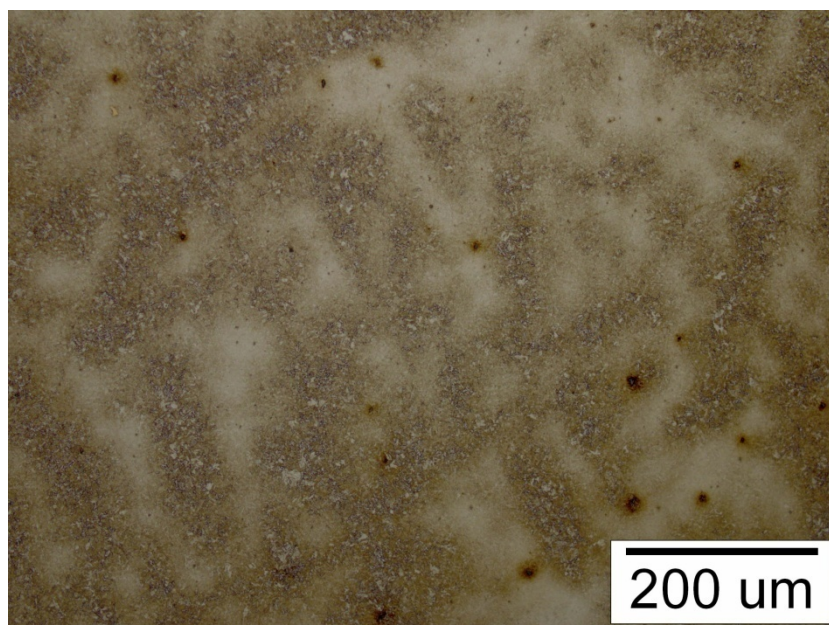


b)

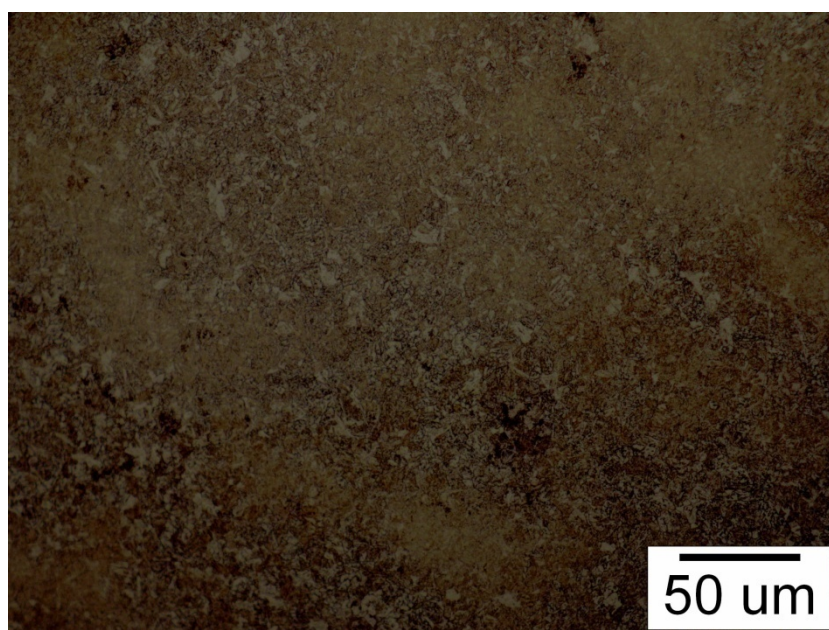
Slika 34. Metalografske snimke uzorka 12,7 mm ugrižanog na 800°C

Povećanje: a) x200 puta b) x500 puta

Na slici 35. prikazani su uzorci kalibra 12,7 mm. Uzorak je ugrižan kroz vrijeme od 1 h pri temperaturi od 900°C, te je nakon toga hlađen na zraku. Prosječna tvrdoća ovog uzorka iznosi 349 HV0,2.



a)

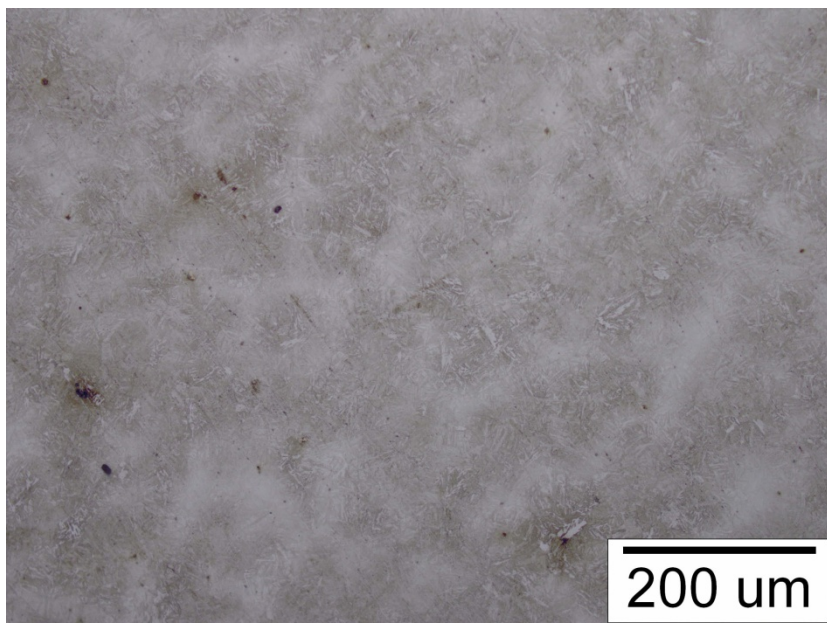


b)

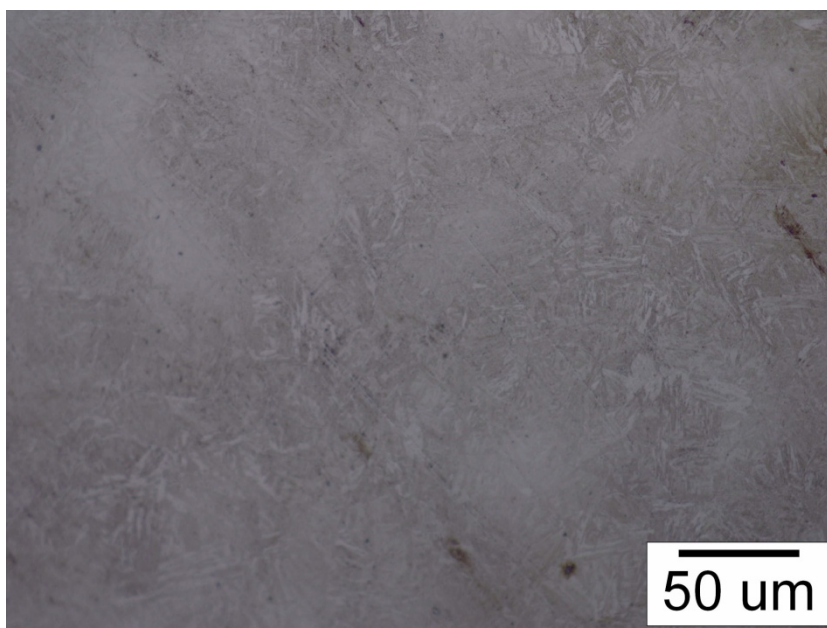
Slika 35. Metalografske snimke uzorka 12,7 mm ugrižavanog na 900°C

Povećanje: a) x200 puta b) x500 puta

Na slici 36. prikazani su uzorci kalibra 12,7 mm. Uzorak je ugrižavan kroz vrijeme od 1 h pri temperaturi od 1000°C, te je nakon toga hlađen na zraku. Prosječna tvrdoća ovog uzorka iznosi 427 HV_{0,2}.



a)



b)

Slika 36. Metalografske snimke uzorka 12,7 mm ugrižavanog na 1000°C

Povećanje: a) x200 puta b) x500 puta

Nakon provedenog ispitivanja koje se sastojalo od mjerenja tvrdoće, određivanja kemijskog sastava, te metalografskog snimanja mikrostrukture uzorka 12,7 mm može se zaključiti sljedeće:

Uzorak 12,7 mm prema početnoj tvrdoći od 371 HV0,2, kemijskom sastavu, te strukturi popuštenog martenzita spada u skupinu čelika za poboljšavanje, kaljen je i

visokotemperaturno popušten. Po kemijskom sastavu, uzorak 12,7 mm najbliži je čeliku **42CrMo4**.

Zagrijavanjem uzoraka na temperaturama od 600°-1000° došlo je do sljedećih promjena:

- kod ovog čelika temperature 600° i 700°C također ne dosežu granicu A_1 , pa se isto tako zadržava mikrostruktura popuštenog martenzita, te dolazi do pada tvrdoće
- temperatura A_1 kod ovog čelika iznosi 730°C
- pri temperaturi 800°C dolazi do znatnog porasta tvrdoće materijala, pri čemu je moguć razlog porasta veći udio kroma u odnosu na ostale ispitivane čelike
- na temperaturi od 900°C povećao se udio feritno-perlitne faze, pa dolazi do pada tvrdoće materijala
- temperatura od 1000°C ponovno uzrokuje porast tvrdoće
- kod zadnje dvije temperature ugrijavanja ovog čelika može se primijetiti različito kretanje tvrdoća u odnosu na ostale ispitivane čelike

7.3.1. Analiza uzorka 12,7 mm na temelju teorijskih podataka

U ovom poglavlju prikazan je izračun teorijske promjene tvrdoće čelika 42CrMo4 u ovisnosti o promjeni temperature materijala. Za razliku od eksperimentalnog dijela, ovdje će se razmatrati niže temperature ugrijavanja, tj. one temperature na kojim bi po prvi puta moglo doći do pada tvrdoće.

Dosta je teško obuhvatiti sve parametre koji utječu na proces ugrijavanja stijenke cijevi, ali kako bi model bio što točniji bitno je odabrati parametre koji imaju najveći utjecaj pri ugrijavanju. Kod rada vatrenog oružja javlja se „isprekidano“ ugrijavanje tijela, tj. stijenke cijevi. Ono je uvjetovano brojem opaljenja oružja u određenom vremenu. Vrijeme u kojem zrno prolazi kroz cijev ovisi o konstrukciji oružja i projektila, te se razlikuje od oružja do oružja, pa ćemo stoga uzeti prosječno vrijeme kretanja od 0,01 s. Vrijeme ugrijavanja cijevi traje sve dok zrno ne napusti cijev, pa možemo reći da vrijeme ugrijavanja cijevi po jednom opaljenju traje isto tako 0,01 s. U obzir nećemo uzimati hlađenje cijevi između dva punjenja, što je zapravo i realno, budući da to hlađenje traje nekoliko stotinki. Time smo isprekidano ugrijavanje zamijenili kontinuiranim ugrijavanjem. Kada smo pojednostavili navedene

parametre, možemo zapisati ovisnost promjene temperature cijevi za jedno opaljenje, a u konačnici i za n opaljenja. Promjena temperature cijevi definirana je sljedećim parametrima:

$$\Delta\theta = f(\lambda, c, \alpha, d_{cijevi}, V_{stijenke}, A_{stijenke}, \vartheta_{plinova}, p_{plinova}, \rho_{cijevi}, t_{ugrijavanja})$$

Isaac Newton je postavio formulu ugrijavanja toplinski dobro vodljivog tijela koje obuhvaća svojstva i dimenzije materijala. Budući da je materijal cijevi izrađen od toplinski dobro vodljivog tijela, te obuhvaća parametre koje smo naveli, formulu možemo koristiti za rješavanje problema ugrijavanja kod ovog modela. Formula ugrijavanja glasi[18]:

$$t_{gr} = \frac{\left(\frac{V}{A}\right) \cdot c \cdot \rho}{\alpha \cdot \varepsilon} \cdot \ln\left(\frac{\vartheta_{plinova} - \vartheta_{početna}}{\vartheta_{plinova} - \vartheta_{završna}}\right), s$$

gdje je:

t_{gr}	vrijeme ugrijavanja stijenke cijevi, s
V	volumen stijenke cijevi, m^3
A	površina unutarnje stijenke cijevi, m^2
c	specifični toplinski kapacitet, J/kg
ρ	gustoća materijala cijevi, kg/m^3
α	koeficijent prijelaza topline, W/m^2K
ε	koeficijent usporenja ugrijavanja, 1
$\vartheta_{plinova}$	temperatura barutnih plinova, $^{\circ}C$
$\vartheta_{početna}$	početna temperatura stijenke cijevi, $^{\circ}C$
$\vartheta_{konačna}$	konačna temperatura stijenke cijevi, $^{\circ}C$

Koeficijent usporenja ugrijavanja ε zavisi o Bitovom broju koji glasi,

$$Bi = \frac{\alpha \cdot \left(\frac{V}{A}\right)}{\lambda},$$

Pa vrijedi: $Bi > 0,5 \rightarrow \varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{1}{3,5 Bi}}$ tj.

$Bi < 0,5 \rightarrow \varepsilon = 1$.

U ovom slučaju je $Bi < 0,5$, te uzimamo da je $\varepsilon = 1$. Budući da je u ovom slučaju poznato vrijeme ugrijavanja t_{gr} , a nepoznanica konačna temperatura $\vartheta_{konačna}$, potrebno je preformulirati Newtonovu jednadžbu. Za početak znamo da vrijedi:

$$y = \ln x, \text{ tj.}$$

$$e^y = x,$$

te stoga možemo reći da je,

$$e^x = \frac{\vartheta_{\text{plinova}} - \vartheta_{\text{početna}}}{\vartheta_{\text{plinova}} - \vartheta_{\text{završna}}},$$

pri čemu je

$$X = \frac{t_{gr}}{\left(\frac{V}{A}\right) \cdot c \cdot \rho \cdot \alpha \cdot \varepsilon},$$

te konačno možemo zapisati:

$$\vartheta_{\text{završna}} = \frac{\vartheta_{\text{plinova}} \cdot e^x - \vartheta_{\text{plinova}} + \vartheta_{\text{početna}}}{e^x}.$$

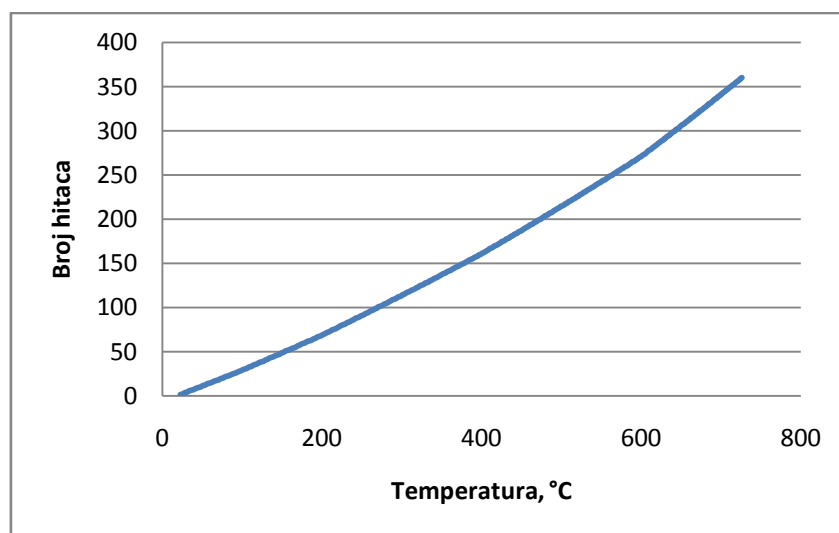
U tablici broj 5. prikazani su rezultati nakon ispaljivanja 360 metaka. Jedan redenik sadrži 120 metaka, tako da se dva puta mijenjao redenik, ali pri tome također pretpostavljamo da nije došlo do hlađenja cijevi. Prikazana je promjena temperature cijevi za svakih 36 opaljenja.

Tablica 5. Promjena temperature cijevi u ovisnosti o broju opaljenja

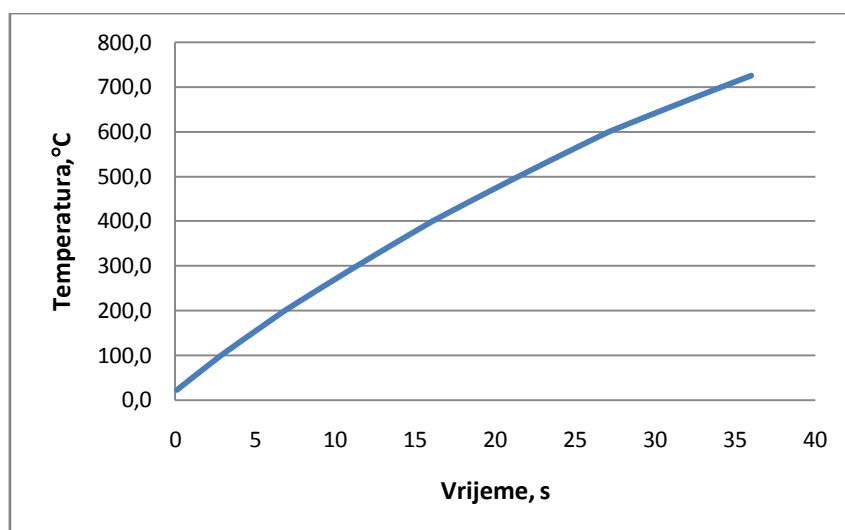
Broj opaljenja	$t_{\text{zagrijavanja}}$	V/A	λ	c	ρ	e	e^x	α	$\vartheta_{\text{plinova}}$	$\vartheta_{\text{početna}}$	$\vartheta_{\text{konačna}}$
1	0,01	0,0246	50	460	7800	1	1,00115	1000	2500	20	22,847
36	0,01	0,0246	50	494	7800	1	1,00107	1000	2500	116,6	119,1
72	0,01	0,0246	48	536	7800	1	1,00107	1000	2500	206,2	208,5
108	0,01	0,0246	48	536	7800	1	1,00098	1000	2500	286,2	288,4
144	0,01	0,0246	45	536	7800	1	1,00098	1000	2500	363,4	365,5
180	0,01	0,0246	42	582	7800	1	1,0009	1000	2500	435	436,9
216	0,01	0,0246	38	582	7800	1	1,0009	1000	2500	501,4	503,2
252	0,01	0,0246	38	582	7800	1	1,0009	1000	2500	565,6	567,4
288	0,01	0,0246	35	687	7800	1	1,00077	1000	2500	623,7	625,1
326	0,01	0,0246	35	687	7800	1	1,00077	1000	2500	677,7	679,1
360	0,01	0,0246	30	687	7800	1	1,00077	1000	2500	724,7	726,1

U rezultatima se može primjetiti vrlo velika razlika između konačnih temperatura $\vartheta_{\text{konačna}}$ i temperatura barutnih plinova $\vartheta_{\text{plinova}}$. Razlog tome je što konačna temperatura označava temperaturu cijelog volumena stijenke cijevi, a ne temperaturu unutrašnje stijenke cijevi. Dodirna površina unutarnje stijenke cijevi i plinova ima znatno višu temperaturu koja

nakon nekoliko opaljenja može doseći i par stotina stupnjeva Celzijusa, dok je na 1-2 mm dubine stijenke temperatura malo više iznad okolišne temperature. Unutarnja stijenka cijevi se i najbrže hladi, pa će se naglo zagrijana stijenka vrlo brzo i ohladiti. U slučaju kada se kontinuirano ispali velik broj hitaca, doći će do velikog povećanja temperature cijelog volumena cijevi, te će pritom i hlađenje unutrašnje stijenke cijevi biti puno sporije. Na slici 37. a) prikazan je dijagram promjene temperature u ovisnosti o broju ispaljenih hitaca, dok je na slici 37. b) prikazana promjena temperature u ovisnosti o vremenu kroz koje se cijev ugrijava.



a)



b)

Slika 37. a) Ovisnost promjene temperature cijevi o broju ispaljenih hitaca

b) Ovisnost promjene temperature cijevi o vremenu ugrijevanja

Kako bismo utvrdili promjenu tvrdoće koja je nastala ugrijavanjem cijevi, potrebno je izračunati tzv. parametar popuštanja P . Parametar popuštanja daje poveznicu između temperature i vremena ugrijavanja, te promjene tvrdoće tijela. Parametar također sadrži i konstantu C koja se određuje iz odgovarajućeg dijagrama, a ona zapravo ovisi o postotku ugljika u nekom materijalu. U ovom slučaju ona iznosi 19. Formula za parametar popuštanja glasi[19]:

$$P = T(C + \log t),$$

gdje je:

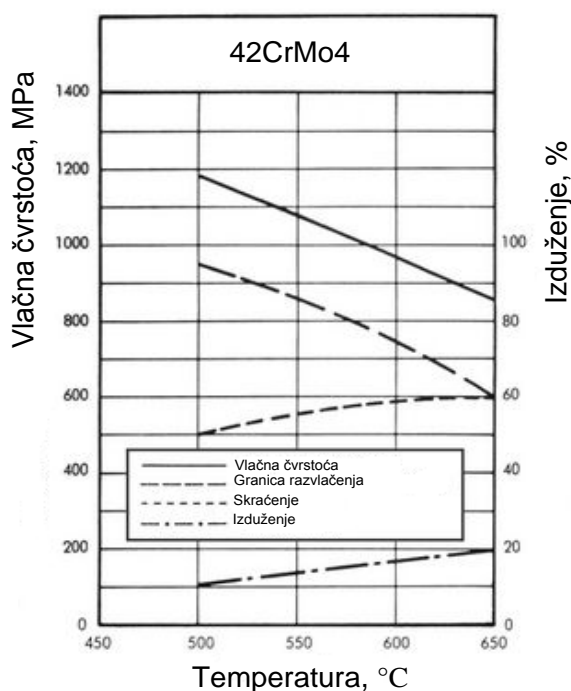
P parametar popuštanja

T temperatura, K

C konstanta, $\%C$

t vrijeme ugrijavanja, h

Čelik 42CrMo4 najčešće se popušta na temperaturi od 500°C uz trajanje od 1 h, pa ćemo stoga pretpostaviti da je i ispitivani čelik također tako popušten. Na slici 38. prikazan je dijagram promjene vlačne čvrstoće u ovisnosti o temperaturi popuštanja čelika 42CrMo4.



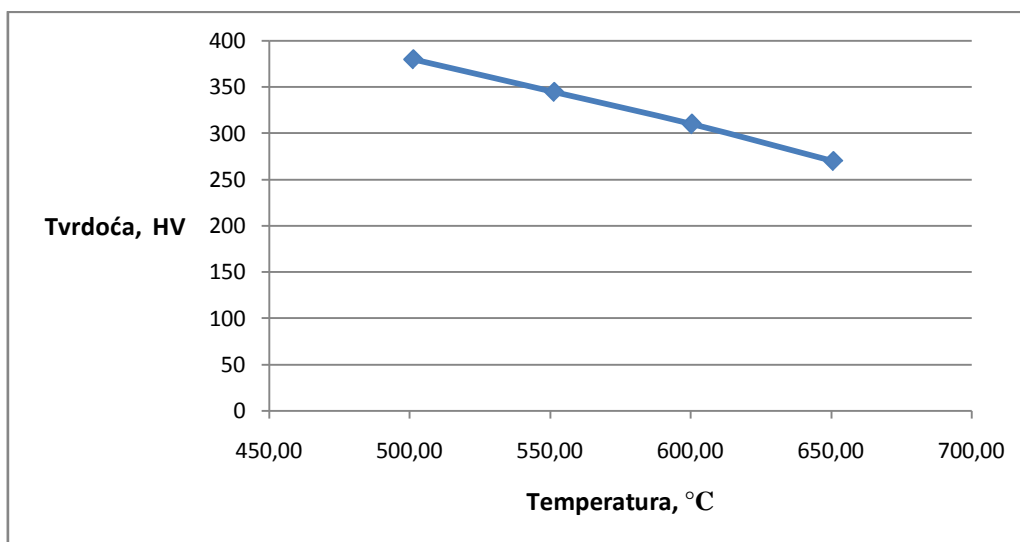
Slika 38. Ovisnost promjene vlačne čvrstoće materijala o temperaturi popuštanja[20]

Budući da je iz dijagrama vidljivo kako već pri temperaturi od 650° dolazi do značajnog pada tvrdoće, više temperature nećemo niti uzimati u obzir. U tablici br 6. prikazane su vrijednosti parametra popuštanja za četiri različite temperature.

Tablica 6. Izračun parametra popuštanja

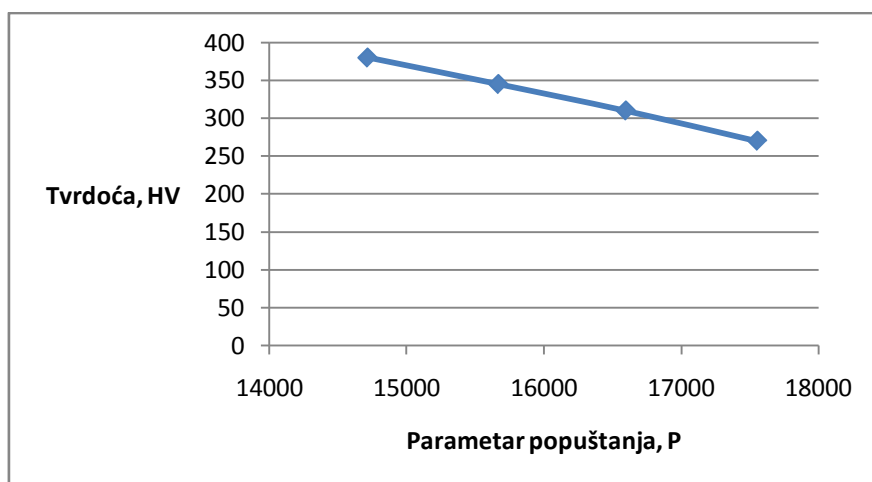
$T_{\text{popuštanja, K}}$	t, h	C	P
(500°C) 773	1	19	14713
(550°C) 823	1	19	15667
(600°C) 873	1	19	16596
(650°C) 923	1	19	17554

Kako je cilj ispitivanja određivanje promjene tvrdoće čelika, a budući da postoji izravna veza između vlačne čvrstoće i tvrdoće, dijagram „vlačna čvrstoća-temperatura popuštanja“ ćemo pretvoriti u dijagram „promjena tvrdoće-temperatura popuštanja“ (sl.39).



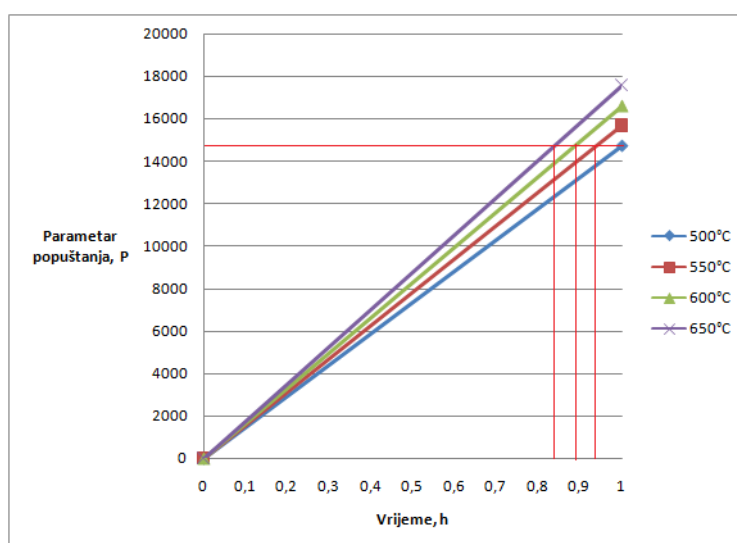
Slika 39. Ovisnost promjene tvrdoće materijala o promjeni temperature

Sad kada znamo vrijednosti parametra popuštanja, te vrijednosti tvrdoće za određenu temperaturu popuštanja, možemo prikazati dijagram promjene tvrdoće u ovisnosti o parametru popuštanja.(sl.40).



Slika 40. Promjena tvrdoće u ovisnosti o parametru popuštanja

Kod proračuna parametra popuštanja vidljivo je da s povećanjem temperature raste i parametar popuštanja. Također s porastom parametra popuštanja povećava se i pad tvrdoće materijala. Budući da je ovaj čelik popuštan na temperaturi od 500°C kroz 1 h, možemo zaključiti da ako temperatura prilikom paljbe kroz 1 h ne prijeđe 500°C, neće doći do popuštanja, tj. popuštanje će biti vrlo malo. Nakon nekog vremena će i to malo popuštanje uzrokovati određeni pad tvrdoće. No veći problem je temperatura koja prelazi 500°C. Kako s temperaturom raste i parametar P, potrebno vrijeme popuštanja se također skraćuje, tj. za kraće vrijeme popuštanja pri višoj temperaturi postiže se isti efekt kao kod dužeg popuštanja pri nižoj temperaturi. Ovisnost parametra P o vremenu popuštanja prikazan je na slici 41.



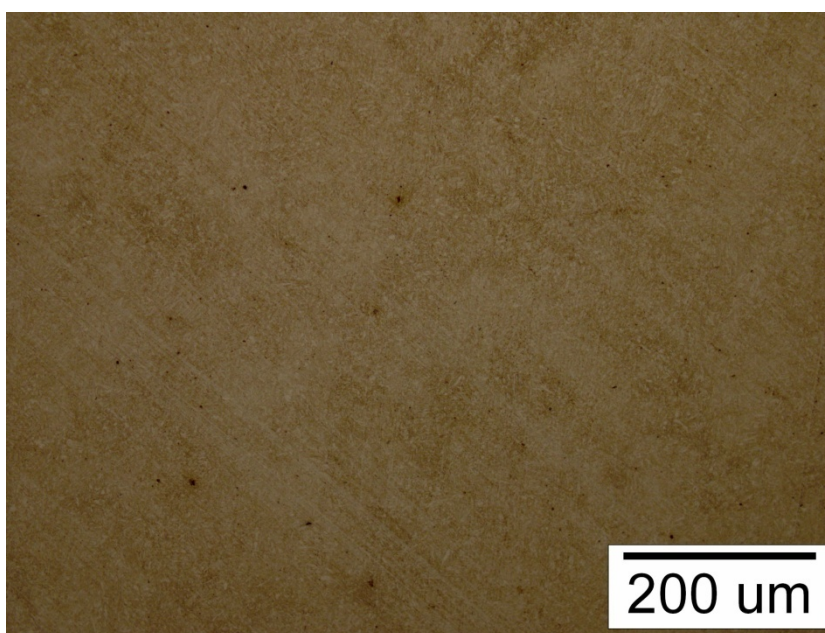
Slika 41. Ovisnost parametra P o vremenu popuštanja

Slika prikazuje vrijednosti parametra P za četiri različite temperature. Kritična vrijednost parametra P je 14713. Ta vrijednost je dobivena na temelju temperature i vremena na kojoj se čelik popuštao prije nego se počeo koristiti, tj. od te vrijednosti parametra će početi padati tvrdoća čelika. Kada povučemo granicu kroz tu vrijednost parametra P , dobivamo vrijeme koje je potrebno da bi se čelik popustio i za druge temperature popuštanja. Pri tome je vidljivo da za temperaturu od 650°C više nije potreban 1 h popuštanja već 0,84 h, tj. 50 min.

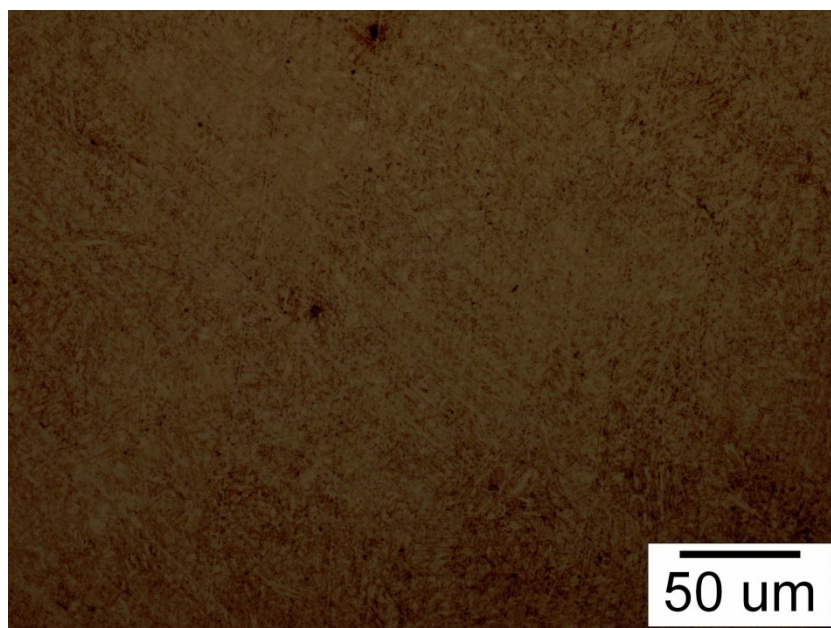
U teorijskom dijelu rada možemo primijetiti da tvrdoća cijelo vrijeme pada, dok je u eksperimentalnom došlo i do porasta tvrdoće. To je zato što smo u teorijskom dijelu uzimali temperature popuštanja samo do 650°C , tj. nije se dosegla temperatura austenitizacije, pa nije došlo do stvaranja novih faza u mikrostrukturi.

7.4. Analiza uzorka 14,5 mm

Na slici 42. prikazani su uzorci kalibra 14,5 mm. Uzorak je ugrijavao kroz vrijeme od 1 h pri temperaturi od 600°C , te je nakon toga hlađen na zraku. Korištena su povećanja $\times 200$ i $\times 500$ puta. Prosječna tvrdoća ovog uzorka iznosi 352 HV0,2.



a)

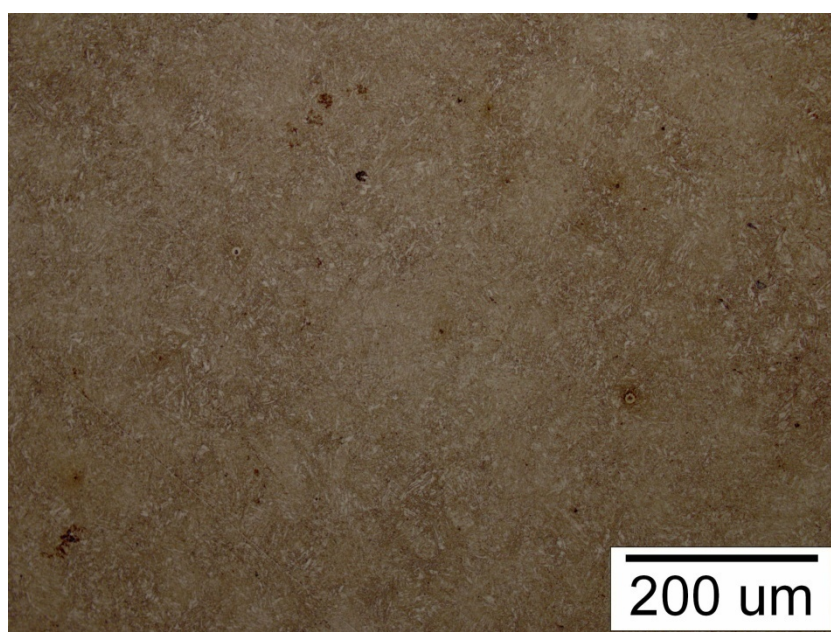


b)

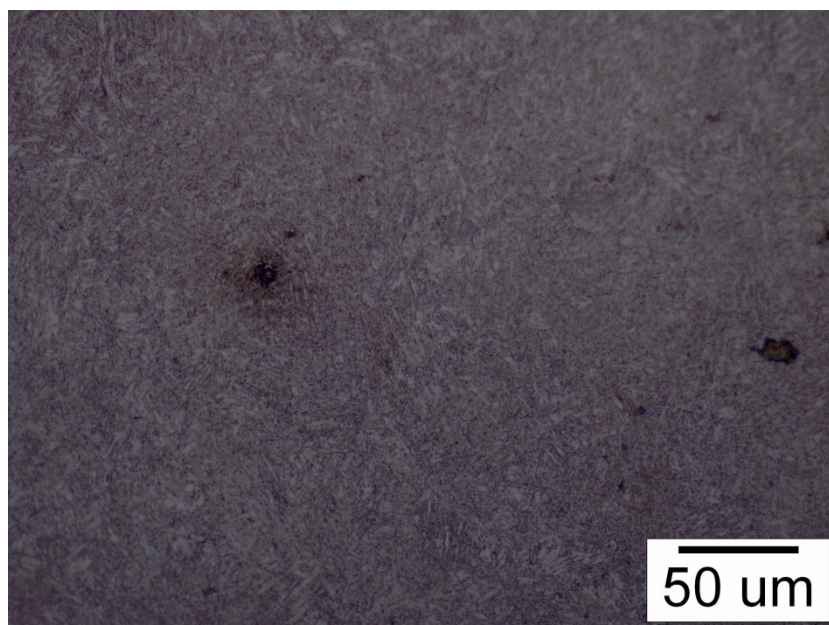
Slika 42. Metalografske snimke uzorka 14,5 mm ugrižavanog na 600°C

Povećanje: a) x200 puta b) x500 puta

Na slici 43. prikazani su uzorci kalibra 14,5 mm. Uzorak je ugrižavan kroz vrijeme od 1 h pri temperaturi od 700°C, te je nakon toga hlađen na zraku. Prosječna tvrdoća ovog uzorka iznosi 273 HV0,2.



a)

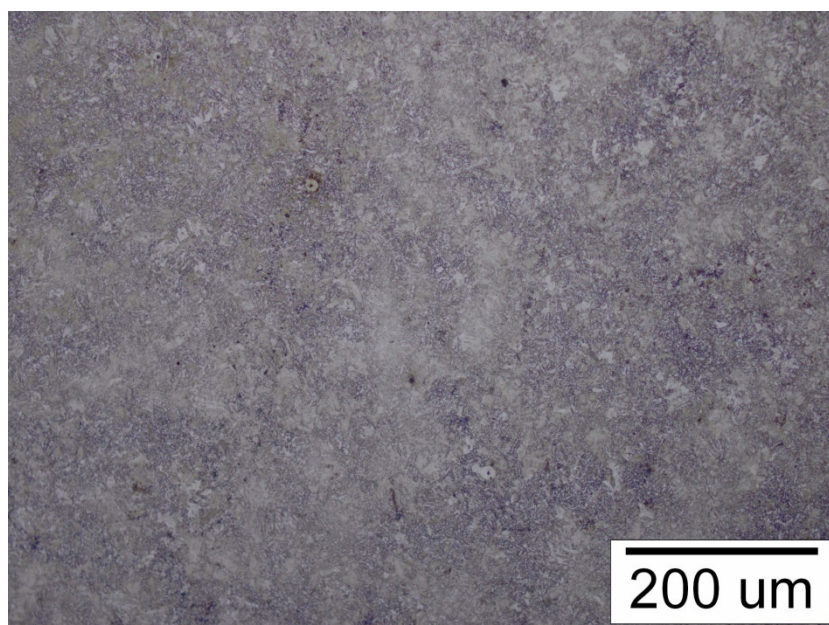


b)

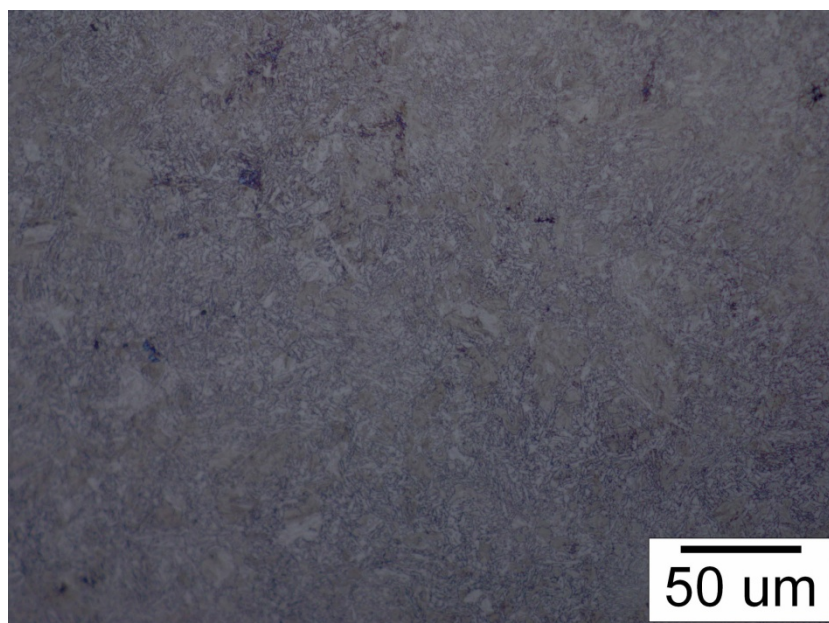
Slika 43. Metalografske snimke uzorka 14,5 mm ugrižavanog na 700°C

Povećanje: a) x200 puta b) x500 puta

Na slici 44. prikazani su uzorci kalibra 14,5 mm. Uzorak je ugrižavan kroz vrijeme od 1 h pri temperaturi od 800°C, te je nakon toga hlađen na zraku. Prosječna tvrdoća ovog uzorka iznosi 291 HV_{0,2}.



a)

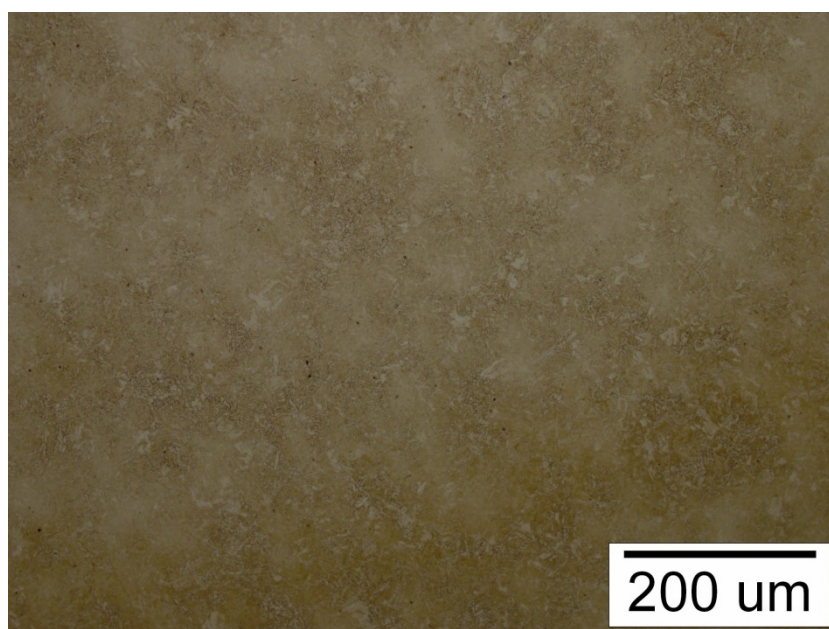


b)

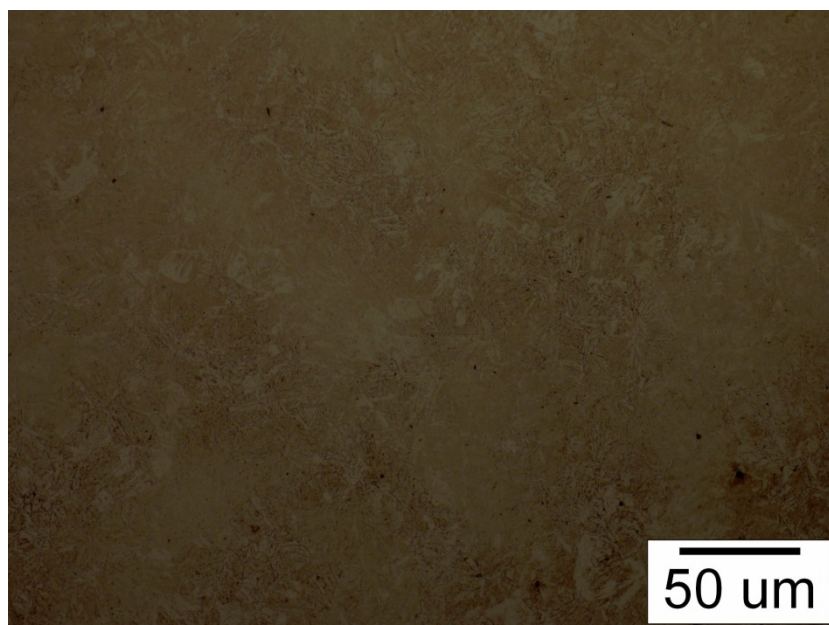
Slika 44. Metalografske snimke uzorka 14,5 mm ugrižavanog na 800°C

Povećanje: a) x200 puta b) x500 puta

Na slici 45. prikazani su uzorci kalibra 14,5 mm. Uzorak je ugrižavan kroz vrijeme od 1 h pri temperaturi od 900°C, te je nakon toga hlađen na zraku. Prosječna tvrdoća ovog uzorka iznosi 339 HV_{0,2}.



a)

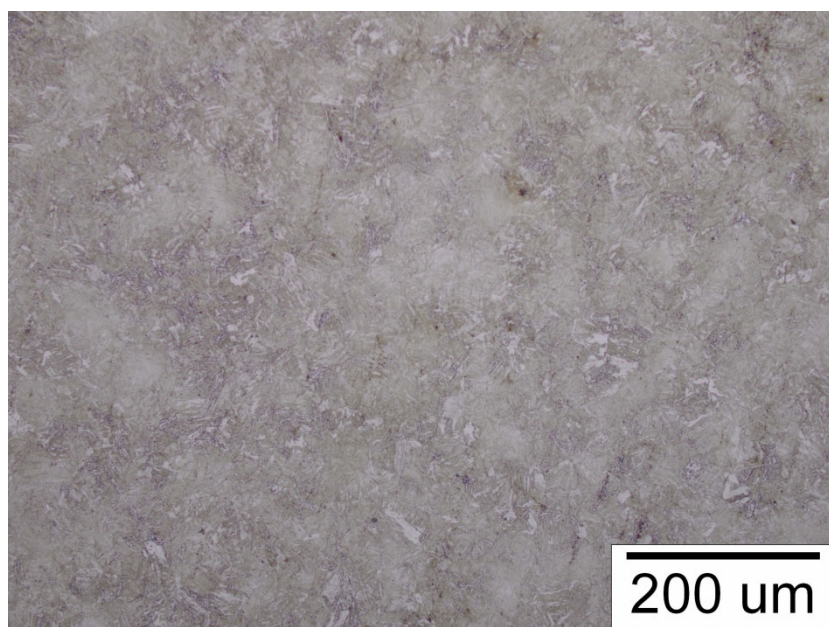


b)

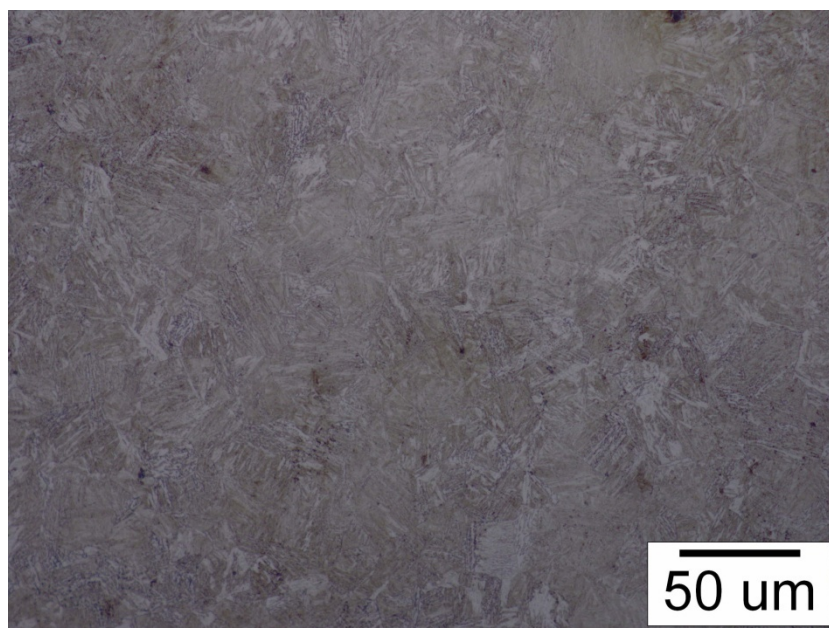
Slika 45. Metalografske snimke uzorka 14,5 mm ugrižavanog na 900°C

Povećanje: a) x200 puta b) x500 puta

Na slici 46. prikazani su uzorci kalibra 14,5 mm. Uzorak je ugrižavan kroz vrijeme od 1 h pri temperaturi od 1000°C, te je nakon toga hlađen na zraku. Prosječna tvrdoća ovog uzorka iznosi 316 HV_{0,2}.



a)



b)

Slika 46. Metalografske snimke uzorka 14,5 mm ugrižavanog na 1000°C

Povećanje: a) x200 puta b) x500 puta

Nakon provedenog ispitivanja koje se sastojalo od mjerenja tvrdoće, određivanja kemijskog sastava, te metalografskog snimanja mikrostrukture uzorka 14,5 mm može se zaključiti sljedeće:

Uzorak 14,5 mm prema početnoj tvrdoći od 443 HV0,2, kemijskom sastavu, te strukturi popuštenog martenzita spada u skupinu čelika za poboljšavanje, kaljen je i visokotemperaturno popušten. Po kemijskom sastavu, uzorak 14,5 mm najbliži je čeliku **30ChN2MFA**.

Zagrijavanjem uzoraka na temperaturama od 600°-1000° došlo je do sljedećih promjena:

- temperature 600° i 700°C također ne dosežu granicu A_1 , ali se može zamijetiti znatniji pad tvrdoće nego kod ostalih čelika s obzirom na tvrdoću nezagrijavanog uzorka,
- temperatura A_1 kod ovog čelika iznosi 720 °C,
- pri temperaturi od 800°C dolazi do blagog porasta tvrdoće,
- promjene nastale popuštanjem s temperatura 900° i 1000°C su slične onim koje su nastale kod čelika 40ChFA
- na temperaturi od 900°C došlo je porasta tvrdoće, dok je na temperaturi od 1000°C ponovno došlo do blagog pada tvrdoće

ZAKLJUČAK

Životni vijek cijevi vatrenog oružja pokazuje koliko se iz nje može ispaliti projektila, a da pad početne brzine projektila i njihovo rasipanje na cilju zadovoljava postavljene uvjete. Obično se cijev smatra istrošenom kada pad početne brzine v_0 prijeđe vrijednost 5%. Pad brzine javlja se zbog istjecanja barutnih plinova između stijenki projektila i cijevi, tj. zbog nemogućnosti brtvljenja plinova prilikom opaljenja. To je posljedica prvenstveno istrošenja unutrašnje stijenke cijevi. Povećanje istrošenja javlja se zbog pada tvrdoće cijevi, što je bio i predmet istraživanja ovog rada.

U radu su prikazani rezultati eksperimentalne analize triju različitih cijevi vatrenog oružja na temelju kojih se može zaključiti koje su kritične mikrostrukture materijala, tj. na kojim temperaturama popuštanja dolazi do najvećeg pada tvrdoće, a time i trošenja cijevi. Za cijev 12,7 mm prikazan je i teorijski proračun kod kojeg se također vidi koje su temperature, tj. parametri popuštanja kritični za povećano istrošenje cijevi. Dobiven je model po kojem se temperatura mijenja u zavisnosti o broju ispaljenih projektila, što je vrlo bitno prilikom rukovanja oružja jer se na taj način može kontrolirati i režim paljbe.

Stanje cijevi vatrenog oružja ima najveći utjecaj na funkcionalnost samog oružja, te se prilikom uporabe svakako treba pridržavati propisanog režima paljbe kako bi se produžio životni vijek oružja.

LITERATURA

- [1] M. Jakopčić, *Osnove topničkog naoružanja*, Skripta, Zagreb, 1996
- [2] <http://weaponsman.com>
- [3] <http://hppublish.com/contents/en-us/p23.html>
- [4] <http://www.hausofguns.com/2011/05/05/what-are-open-sights/>
- [5] R. Abduli, M. Cvetković, I. Kravos, N. Kršić, R. Obbrenović, V. Pejčić, *Osnovi klasičnog naoružanja*, Zagreb, 1973.
- [6] http://hr.wikipedia.org/wiki/Zastava_M70
- [7] <http://g503.com/forums/viewtopic.php?f=30&t=214141>
- [8] http://hr.wikipedia.org/wiki/Browning_M2
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/KPV_heavy_machine_gun
- [10] <http://www.armyrecognition.com>
- [11] M. Stupnišek, F. Cajner, *Osnove toplinske obradbe metala*, Hrvatsko društvo za toplinsku obradbu, Zagreb 1996.
- [12] http://www.shootingvoodoo.com/index.php/articles/anatomy_of_a_tactical_bolt_action_rifle_the_bar/
- [13] http://www.hunter-ed.com/michigan/studyGuide/Rifling-in-the-Rifle-or-Handgun-Bore/201023_700042720
- [14] http://www.hunter-ed.com/washington/studyGuide/Firing_Sequence_/20105001_700046703
- [15] <http://www.labcompare.com/237-Glow-Discharge-Spectrometer-GD-AES/1232-GDS-850A-Glow-Discharge-Atomic-Emission-Spectrometer/>
- [16] <http://www.microscopesales.co.uk/olympus-microscopes/materials-science-microscopes/olympus-gx71.html>
- [17] <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/hardness-testing-part-1-074/>
- [18] D. Landek, *Modeliranje i simulacije- podloge za predavanje i vježbe*, 2012.
- [19] D. Krumes, *Toplinska obrada*, Slavonski brod, 2000.
- [20] <http://www.oyalmetal.com/tabllar/330-vcmo140.html>